

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh a simulace kvazi-distribuovaného senzoru  
mechanického napětí založeného na Braggovských mřížkách  
využívajícího vlnový multiplex v prostředí OptiSystem**

**Design and Simulation of Quasi-Distributed Mechanical  
Stress Sensor Based on Bragg's Gratings Using Wavelength-  
Division Multiplexing in Optisystem enviroment**

**2015**

**Bc. Jiří Vlk**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jiří Vlk**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Návrh a simulace kvazi-distribuo­vaného senzoru mechanického napětí založeného na Braggovských mřížkách využívajícího vlnový multiplex v prostředí OptiSystem  
Design and Simulation of Quasi-Distributed Mechanical Stress Sensor Based on Bragg's Gratings Using Wavelength-Division Multiplexing in OptiSystem Environment

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout a na simulacích ověřit funkci kvazi-distribuo­vaného systému pro měření mechanického napětí založeného na Braggovských optovláknových mřížkách

1. Popis senzoru mechanického napětí využívajícího Braggovské mřížky.
2. Návrh vlnového multiplexu pro kvazi-distribuo­vaný senzor.
3. Simulace kvazi-distribuo­vaného senzoru mechanického napětí v prostředí OptiWave.
4. Zhodnotě dosažené vlastnosti z hlediska citlivosti navrženého systému.

Seznam doporučené odborné literatury:

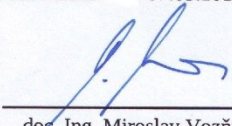
OTHONOS, Andreas a Kyriacos KALLI. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Artech House, 1999. ISBN 978-0890063446  
YIN, Shizhuo, Paul B. RUFFIN a Francis T.S. YU. Fiber Optic Sensors, Second Edition. 2. vyd. CRC Press, 2008. ISBN 978-1420053654

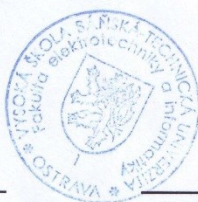
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

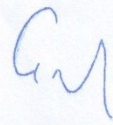
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Skapa, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty



## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 3. května 2015

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Janu Skapovi, Ph.D. za vedení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Marcelovi Fajkusovi za konzultace, spoustu připomínek a cenných rad. Také bych chtěl poděkovat mým rodičům a přítelkyni za trpělivost a podporu během celého studia.

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je návrh a simulace senzoru mechanického napětí používajícího Braggovské mřížky. Diplomová práce je rozdělena na dvě části.

V první části jsou popsány teoretické poznatky ohledně základního prvku použitého pro senzorovou část a to Braggovské mřížky. Je zde vysvětleno, jak lze Braggovskou mřížku zapsat do optického vlákna, jaké existují typy mřížek a také použití systému s těmito mřížkami v reálných podmínkách.

Druhá část je zaměřena na praktický návrh a simulaci senzoru mechanického napětí používající Braggovské mřížky v programu Optiwave OptiSystem 13. V této části je popsáno nastavení jednotlivých prvků v návrhu pro dva systémy. Prvním je vyhodnocování pomocí Fabry Perotova optického filtru a u druhého je k vyhodnocování použito Braggovských mřížek. Také jsou zde uvedeny výsledky simulací se zadanými parametry pro oba typy vyhodnocování. Z těchto výsledků jsou následně vypočítány základní parametry pro každý systém, jako jsou citlivost, rozsah a přesnost.

## **Klíčová slova**

Braggovské mřížky; OptiSystem; návrh a simulace, mechanické napětí

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on the design and simulation of mechanical stress sensor utilizing Bragg grating. The thesis is divided into two parts.

In the first part there are theoretical knowledge about the basic element used for the sensor part thus Bragg gratings. It explains how to write the Bragg grating to optical fiber, what are the types of grids and the use of these grids in real conditions.

The second part is focused on the design and simulation of mechanical stress sensor using Bragg gratings in the program Optiwave OptiSystem 13. This section describes the settings of individual components in the design for the two systems. The first is using a Fabry-Pérot evaluation of the optical filter and the second is using the Bragg grating. There are also shown simulation results with specified parameters for both types of evaluation. From these results are calculated basic parameters for each system, such sensitivity, range and accuracy.

## **Key words**

Bragg grating; OptiSystem; design and simulation; mechanical stress

## Seznam použitých zkratek

| <b>Zkratka</b> | <b>Význam</b>  |
|----------------|--|
| <b>AOTF</b>    | acousto-optical tunable filter (akusticko-optický laditelný filtr)                 |
| <b>APD</b>     | avalanche photodiode (lavinová fotodioda)  |
| <b>CCD</b>     | charge-coupled device (zařízení s vázanými náboji)                                 |
| <b>CW</b>      | continuous wave (kontinuální vlna)   |
| <b>DBR</b>     | distributed bragg reflector (dielektrické Braggovo zrcadlo)                        |
| <b>DWDM</b>    | dense wavelength division multiplexing hustý vlnový multiplex                      |
| <b>EDFA</b>    | erbium doped fibre amplifier (erbiem dopovaný vláknový zesilovač)                  |
| <b>EMI</b>     | electromagnetic interference (elektromagnetická rušení)                            |
| <b>FBG</b>     | fiber bragg grating (vláknové Braggovské mřížky)                                   |
| <b>FOS</b>     | fibre optic sensors (vláknové optické senzory)                                     |
| <b>FPF</b>     | Fabry-Pérot filter (Fabry Perotův filtr)   |
| <b>FRM</b>     | Faraday rotator mirrors (Faradayova rotační zrcadla)                               |
| <b>GODC</b>    | germanium oxygen deficient center (germanium-kyslíková deficitní centra)           |
| <b>LED</b>     | light-emitting diode (dioda emitující světlo)                                      |
| <b>LPF</b>     | low-pass filter (filtr dolní propust)  |
| <b>MCVD</b>    | modified chemical vapour deposition (modifikovaná depozice z plynné fáze)          |
| <b>OPD</b>     | optical path difference (rozdíl optické dráhy)                                     |
| <b>PZT</b>     | piezoelectric transducer (piezoeletrického převodníku)                             |
| <b>RF</b>      | radio frequency (rádiová frekvence)  |
| <b>SDM</b>     | spatial division multiplexing (prostorový multiplex)                               |
| <b>SLED</b>    | superluminescent light-emitting diodes (superluminiscenční dioda emitující světlo) |
| <b>SM</b>      | single mode (jednovidové optické vlákno)   |
| <b>TDM</b>     | time division multiplexing (časový multiplex)                                      |
| <b>UV</b>      | ultraviolet (ultrafialové)   |
| <b>VCO</b>     | voltage controlled oscillator (napětově řízený oscilátor)                          |
| <b>VPN</b>     | virtual private network (virtuální privátní síť)                                   |

# Obsah

|       |   |        |
|-------|---|--------|
| 1     | Úvod.....   | - 1 -  |
| 2     | Braggovské mřížky .....                                     | - 2 -  |
| 2.1   | Definice Braggovských vláknových mřížek .....               | - 2 -  |
| 2.2   | Fotocitlivost v optických vláknech.....                     | - 3 -  |
| 2.2.1 | Metody pro zvýšení fotocitlivosti v optických vláknech..... | - 3 -  |
| 2.2.2 | Fotocitlivé typy FBG.....                                   | - 5 -  |
| 2.3   | Techniky výroby vláknových mřížek.....                      | - 6 -  |
| 2.3.1 | Interferometrická metoda .....                              | - 7 -  |
| 2.3.2 | Metoda bod po bodu.....                                     | - 7 -  |
| 2.3.3 | Metoda fázové masky.....                                    | - 8 -  |
| 2.4   | Typy Braggovských mřížek .....                              | - 10 - |
| 2.4.1 | Uniformní mřížky .....                                      | - 10 - |
| 2.4.2 | Apodizované mřížky .....                                    | - 11 - |
| 2.4.3 | Blazed mřížky.....  | - 11 - |
| 2.4.4 | Chirped mřížky.....   | - 11 - |
| 3     | Využití FBG jako senzoru.....                               | - 13 - |
| 3.1   | Vyšetřovací techniky .....                                  | - 13 - |
| 3.1.1 | Konverze vlnové délky - amplituda .....                     | - 13 - |
| 3.1.2 | Konverze vlnové délky - frekvence.....                      | - 16 - |
| 3.1.3 | Konverze vlnové délky - fáze.....                           | - 17 - |
| 3.1.4 | Konverze vlnové délky - umístění.....                       | - 18 - |
| 3.1.5 | Konverze vlnové délky - čas .....                           | - 18 - |
| 3.1.6 | Fourierova transformace.....                                | - 19 - |
| 3.2   | Multiplexní techniky .....                                  | - 20 - |
| 3.2.1 | WDM.....  | - 20 - |
| 3.2.2 | TDM.....  | - 21 - |
| 3.2.3 | WDM /TDM.....   | - 21 - |
| 3.2.4 | SDM .....   | - 22 - |
| 3.2.5 | SDM a TDM.....  | - 23 - |



|       |  |        |
|-------|--|--------|
| 3.2.6 | SDM a WDM .....  | - 23 - |
| 4     | Aplikace FBG.....  | - 24 - |
| 4.1   | Velké kompozitní a betonové stavby .....                         | - 24 - |
| 4.2   | Elektrické rozvodné sítě .....                                   | - 25 - |
| 4.3   | Medicína.....  | - 25 - |
| 4.4   | Chemické snímače.....  | - 26 - |
| 5     | Návrh kvazi-distribuovaného systému v prostředí Optisystem.....  | - 28 - |
| 5.1   | OptiSystem .....   | - 28 - |
| 5.2   | Návrh samotného systému v programu OptiSystem .....              | - 28 - |
| 5.2.1 | Návrh senzorové části .....                                      | - 29 - |
| 5.2.2 | Návrh vyhodnocovací části .....                                  | - 33 - |
| 5.3   | Simulace kvazi-distribuovaného senzoru mechanického napětí ..... | - 36 - |
| 5.3.1 | Fabry Perotův filtr .....  | - 36 - |
| 5.3.2 | FBG .....  | - 37 - |
| 5.3.3 | Parametry limitující maximální počet senzorů.....                | - 39 - |
|       | Závěr .....  | - 41 - |
|       | Použitá literatura .....   | - 42 - |
|       | Seznam příloh.....   | - 44 - |

# 1 Úvod

V průběhu posledních dvaceti let došlo k významné revoluci produktů v důsledku růstu optoelektornických a optických komunikačních technologií. Jedním ze směrů tohoto růstu jsou senzory optických vláken, které se posunuly z laboratorního výzkumu do etapy praktického využití v různých aplikacích. Jedním z těchto senzorů je vláknová Braggovská mřížka (FBG).

V první části této diplomové práce postupně probereme základy týkající se právě Braggovských mřížek. Následně se dostaneme k vysvětlení principu Braggovské mřížky a definování jejich základních parametrů. Důležitým prvkem je výroba a s tím spjatá fotocitlivost optických vláken, do kterých se tato mřížka vписuje. Popis jednotlivých technik a také výrobních procesů, které se v dnešní době používají. Tím bychom se dostali k rozboru různých druhů mřížek, dělených jak podle fotocitlivosti, tak podle prostorového rozložení změny indexu lomu v jádře vlákna. Dalším bodem je využití FBG, jako senzoru s popisem různých druhů vyšetřovacích technik. Popis většiny multiplexních technik, používaných právě v senzorovém odvětví s Braggovskými mřížkami, je nezbytností z hlediska zadání a návrhu systému využívajícího vlnový multiplex.

Druhá část práce se zabývá návrhem a také simulací systému využívajícího vlnový multiplex. Pro tyto účely bylo použito prostředí OptiSystem 13. V programu je nutné nasimulovat systém, který bude reagovat na změny deformace (strain) a následně je bude správně vyhodnocovat. Pro vyhodnocování budou zvoleny dva druhy optického filtru a to Fabry Perotův optický filtr a také Braggovská mřížka. Výsledkem těchto simulací obou systémů je jejich porovnání a popsání jejich důležitých parametrů, jako jsou citlivost a přesnost.

## 2 Braggovské mřížky

V posledních desetiletích bylo vyvíjeno značné úsilí v oblasti výzkumu a vývoje pro vytvoření nové třídy optických vláknových částí a to UV vepsaných mřížek. Hlavní hnací síla pochází z nutnosti a potřeby vytvořit nové vysoce výkonné zařízení s vláknovými mřížkami jako jsou například filtry pro vlnové multiplexy (WDM), erbiem dopované vláknové zesilovače (EDFA) a disperzní kompenzátory, sloužící pro zvýšení šířky pásma pro vysokorychlostní telekomunikační síťové systémy. Není pochyb o tom, že vysoká poptávka na vláknová mřížková zařízení povede k pokračujícímu snižování ceny těchto technologií, což bude vést k růstu snímačů založených na těchto technologiích.

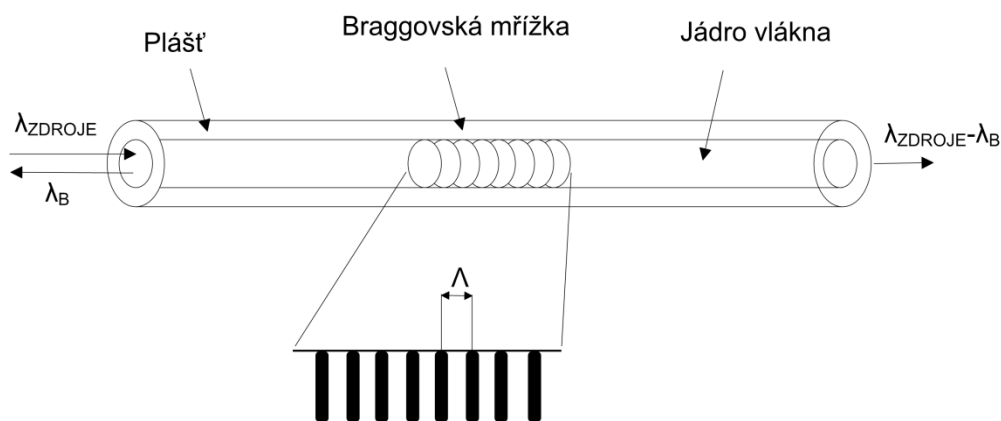
Senzory s mřížkami v optickém vlákně mají mnoho výhod oproti konvenčním elektrickým a jiným optickým snímačům. Jsou relativně jednoduché, levné na výrobu a imunní vůči elektromagnetickému rušení. Mají malé rozměry a také lineární odezvy. Jejich nejvýznamnější schopností je multiplexování vlnové délky umožňující použití velkého množství mřížek v jednom kusu optického vlákna, které nám vytváří datovou senzorovou síť. Použití těchto optických mřížek představuje významný krok k vývoji inteligentních struktur, které povedou ke zlepšení bezpečnosti, ale také finanční stránky mnoha odvětví jako je strojírenství, lékařství a stavebnictví u kterého je možné použití v konstrukci mostů, tunelů a přehrad.

### 2.1 Definice Braggovských vláknových mřížek

Vláknové Braggovské mřížky jsou typem distribuovaného Braggova reflektoru vyrobeného na krátkém úseku optického vlákna, který odráží určité vlnové délky světla a všechny ostatní přenáší dále, viz obrázek 2.1. Tohoto je dosaženo vytvořením periodické změny indexu lomu jádra podél osy vlákna s periodou  $\Lambda$  a amplitudou  $\delta n$  ve vlákně, které generuje dielektrické Braggovo (Distributed Bragg Reflector DBR) zrcadlo specifické vlnové délky. Vláknové Braggovské mřížky mohou být proto použity jako vložený optický filtr k blokování určité vlnové délky jako vlnově specifický reflektor. Vlnová délka, při níž se světlo odráží s největší efektivitou, se nazývá Braggova rezonanční vlnová délka  $\lambda_B$ . Vztah pro závislost mezi prostorovou periodou mřížky a Braggovou rezonanční vlnovou délkou je dán vzorcem:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad 2.1$$

kde  $n_{eff}$  je efektivní vidový index,  $\Lambda$  je prostorová perioda mřížky a  $\lambda_B$  který udává Braggovskou rezonanční vlnovou délku. Braggova vlnová délka  $\lambda_B$  se mění se změnou efektivního vidového indexu  $n_{eff}$  a změnou prostorové periody mřížky.



Obrázek 2.1: *Braggovská vláknová mřížka*

## 2.2 Fotocitlivost v optických vláknech

Existence možnosti vytvoření změny indexu lomu v jádře optického vlákna byla objevena v roce 1979 Ken Hillem a jeho spolupracovníky. Tato mřížka vznikla svícením argon-iontovým laserem na vlnové délce 514 nm vlivem dvoufotonové absorpce. Dnes se tato metoda nepoužívá. Gerald Meltz a jeho kolegové přišli na způsob kontrolovaného a efektivního vytvoření vláknové mřížky při použití UV laseru. Fotocitlivost optických vláken je daleko vyšší při použití v ultrafialové oblasti.

Braggovské mřížky se vytváří pomocí systematické (periodické nebo neperiodické) změny indexu lomu jádra speciálního typu optického vlákna pomocí intenzivního ultrafialového (UV) zdroje, jako je UV laser. Používají se dva hlavní procesy a to interference a maskování. Volba metody, závisí na typu mřížky, která má být vyrobena. Běžně se výrobu vláknových Braggovských mřížek používají germaniem-dopovaná oxid křemičitá vlákna. Germanium-dopované vlákno je fotosenzitivní, což znamená, že index lomu jádra se mění s expozicí UV záření. Velikost změny je závislá na intenzitě a trvání expozice, jakožto i na fotocitlivosti vlákna. Pro vytvoření vysoké odrazivosti vlákna Braggovské mřížky přímo ve vlákně musí být úroveň dopingu germaniem vysoká. Standardní vlákna mohou být použita v případě, že fotocitlivost zlepšíme máčením vlákna ve vodíku.

V současné době se vláknové mřížky obvykle vyrábí metodou boční expozice při použití KrF laserů nebo argon-ion laserů. Variační intenzity vzoru, které jsou potřebné pro zapsání mřížky do vláken, se vyrábí pomocí metody fázové masky, metody holografické nebo skenování laserového paprsku s intenzivní modulací.

### 2.2.1 Metody pro zvýšení fotocitlivosti v optických vláknech

Od objevení fotocitlivosti v optických vláknech se vyvíjí neustálé usilí k jejímu pochopení a také snaha ke zlepšování celkové fotocitlivosti. Standardní telekomunikační vlákna s obsahem germania okolo 3% dosahují změny indexu lomu okolo  $3 \times 10^{-5}$ . Zvyšováním úrovně dopace vede ke zvýšení na přibližnou hodnotu  $5 \times 10^{-4}$ . V některých aplikacích je však zapotřebí

navýšení změny indexu lomu až v řádu  $10^{-3}$ . Těchto hodnot můžeme dosáhnout pomocí několika metod, jako jsou např. žárové žíhání, hydrogenizace nebo dopace dalším prvkem.

Jednou z jednodušších technik používaných ke zvýšení fotocitlivosti je zvyšování obsahu germania v jádru vlákna. Fotocitlivost souvisí s množstvím výskytu defektních (GODCs) center v jádru vlákna. Tyto centra jsou spojena s absorpcí světla na vlnové délce 240 nm. Tím vznikají Ge-Ge vazby tedy chybné spoje. Jelikož výskyt těchto center roste s koncentrací germania, tak zvýšením počtu těchto defektů dochází ke zvýšení samotné fotocitlivosti. Změna indexu lomu, kterou vyvolává UV záření, roste přibližně lineárně s koncentrací germania ve vlákne. Pro standardní vlákna je velikost změny  $\delta n$  okolo hodnoty  $3 \times 10^{-5}$  ( $3 \text{ mol } \% \text{ GeO}_2$ ) až k hodnotě  $2,5 \times 10^{-4}$  pro vlákna vysoce dopovaná ( $\sim 20 \text{ mol } \% \text{ GeO}_2$ ) [4].

Další možností zvýšení fotocitlivosti je použití hydrogenace. Jedná se o difuzi molekul vodíku do vlákna. Hydrogenace má minimální vliv na Ge vlákna. Naopak pro vlákna Ge vysoce dopovaná a vlákna B / Ge je účinek této metody vysoký. Při této metodě je vlákno vloženo do tlakové komory na několik dní až týdnů. V této komoře je plynný vodík a na vlákno působí tlak 150 (až do 750) atmosfér při teplotách 20-75°C [6]. Tímto lze dosáhnout změny indexu lomu až  $10^{-2}$ . V oblastech, které nebyly osvětleny, se vodík dostává ven z vlákna a díky tomu nejsou ovlivněny přenosové vlastnosti, které by působily OH skupiny[1].

Žárové žíhání je jednoduchá a efektivní technika, sloužící ke zlepšování fotocitlivosti Ge vláken. Zvyšování fotocitlivosti použitím žárového žíhání způsobuje nízké zvýšení útlumu v důležitých komunikačních oknech. Oblast optické vlákna, u které má být zvýšena fotocitlivost je opakovaně vystavována plameni vodíku s malým množstvím kyslíku. Teplota tohoto plamene se pohybuje kolem 1700°C a celkový proces trvá 20 minut. Tím se vytváří GODCs a vyvolává se silné absorpční pásmo na vlnové délce 240 nm. Celý tento proces vede k vysokému nárůstu fotocitlivosti jádra vlákna a to až na desetinásobek u běžného telekomunikačního vlákna. Změna indexu lomu je poté až  $10^{-3}$ . Techniky zlepšení fotocitlivosti hydrogenace a žárové žíhání sledují stejný koncept. V obou případech je vodík použit k chemické reakci germano-křemičitého skla pro formování GODCs, která jsou příčinou fotocitlivosti. Tato metoda má několik výhod. Zvýšení fotocitlivosti ve vlákne je permanentní na rozdíl od hydrogenace, kde vlákno ztrácí fotocitlivost kvůli difuzi vodíku z vlákna. Umožňuje vytváření silných Braggovských mřížek (s velkým  $\delta n$ ) ve standardních telekomunikačních vláknech, která typicky nemají žádnou fotocitlivost. Jedním z největších nedostatků je zeslabení vlákna v důsledku použití velkých teplot plamene a s tím související menší stabilita pro dlouhodobé použití takto vytvořených mřížek[1].

Dopování dalším prvkem je další možností pro zvýšení fotocitlivosti optických vláken. V praxi se používá dopování bórem, které vede k zvýšení fotocitlivosti až na čtyřnásobek oproti běžným germanium-křemičitém vláknům. Tato vlákna se vyrábí použitím MCVD techniky. Germanium-bór dopovaná vlákna byla vyráběna s kompozicí germania 15 mol %. Takto dopovaná vlákna nejsou ovlivněna absorpcí na vlnové délce 240 nm. Dopace bórem tedy nezvyšuje fotocitlivost prostřednictvím vzniku GODC, jak je tomu u předešlých metod. Zvýšení

fotocitlivosti je způsobeno změnou termomechanických vlastností na rozhraní bór dopovaného jádra a pláště [1].

Pro velké množství dalších aplikací je zapotřebí vyrobit mřížku ve vláknech pomocí dopace vzácnými kovy. Takový zápis je však více složitější než je tomu u vláken obyčejných. Používá se i nahrazování germania hliníkem a to z důvodu redukce zakalení vlákna, které vede ke snížení životnosti. Tento nedostatek germania ve vláknech poté způsobuje velké snížení fotocitlivosti. Jako další dopanty je možné použít Er, Ce, Nd a Tb. Mřížky mohou být zapsány do většiny vláken, avšak změna indexu lomu pro osvit při 240 nm je velice malá ( $<10^{-4}$ ). Při použití hydrogenace dochází k nárůstu změny indexu lomu až na  $10^{-3}$  [1].

Tabulka 1.1: *Porovnání různých typů vláken*

| Typ vlákna                                    | Vláknový $\Delta n$ | Fotocitlivost $\delta n$ | Maximální odrazivost pro 2 mm mřížku | Čas nutný k vytvoření fotocitlivosti |
|---|---------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Standardní telekomunikační Ge ~ 4% mol</b> | 0,005               | $3,4 \times 10^{-5}$     | 1,2%                                 | 2 hodiny                             |
| <b>S vysokým obsahem Ge ~ 20% mol</b>         | 0,03                | $2,5 \times 10^{-4}$     | 45%                                  | ~ 2 hodiny                           |
| <b>S redukováným obsahem Ge ~ 10% mol</b>     | 0,01                | $5 \times 10^{-4}$       | 78%                                  | ~ 1 hodina                           |
| <b>Dopace bórem s obsahem Ge ~ 15% mol</b>    | 0,003               | $7,5 \times 10^{-4}$     | 95%                                  | ~ 10 minut                           |

## 2.2.2 Fotocitlivé typy FBG

Braggovské mřížky se dají podle fotocitlivosti rozdělit na tři typy, typ I, typ II a typ IIA. Výsledný typ mřížky závisí na počátečních podmínkách zápisu (výkon a vlnová délka laseru, CW dodaná pulzní energie) a na vlastnostech vlákna.

### 2.2.2.1 Braggovské mřížky typu I

Tyto mřížky jsou vyráběny z normálních fotocitlivých vláken a dosahují středních intenzit. K vytvoření těchto mřížek na většině běžných vláken se používá osvit kontinuálním nebo pulzním UV zářením a to pulzy s energií kolem  $100 \text{ mJ/cm}^2$  a kumulativní energií nad hodnotu  $500 \text{ J/cm}^2$ . Odražené spektrum je komplementární k přenesenému spektru, což znamená, že jsou zde zanedbatelné ztráty v důsledku absorpce nebo odrazu. To je základní charakteristikou Braggovských mřížek typu I. Tento typ je nejvíce používaným a pracuje



při teplotách  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ . K vymazání těchto mřížek však dochází již při relativně nízkých teplotách kolem  $200^{\circ}\text{C}$ . Teploty však pokrývají většinu použití v telekomunikacích a také v senzorových aplikacích.

#### **2.2.2.2 Braggovské mřížky typu IIA**

Mřížky typu II mají stejné spektrální charakteristiky jako mřížky typu I. Přenosová a odražená spektra jsou komplementární a činí tento typ mřížky ve statických situacích k nerozeznání od mřížek typu I. Nicméně kvůli odlišným mechanismům souvisejícím s formací těchto mřížek jsou mezi těmito mřížkami odlišnosti, které lze pozorovat za dynamických podmínek. Tento typ mřížek je vepsaný do vlákna dlouhým procesem expozice, která závisí na typu vlákna a dalších faktorech. Celkový čas potřebný k zapsání mřížky do vlákna je přibližně 30 minut. Zásadní výhodou mřížek typu IIA nad mřížkami typu I je vylepšená teplotní stabilita, což může být velmi užitečné, pokud je systém vystaven prostředí s vysokými teplotami (jak tomu může být u snímačů). K samotnému vymazání mřížky dojde při teplotě  $500^{\circ}\text{C}$ .

#### **2.2.2.3 Braggovské mřížky typu II**

Mřížky typu II jsou nejvíce odlišným typem od ostatních typů mřížek. Jsou vytvářeny pomocí jediného pulzu z pulzního laseru na energetických úrovních vyšších než  $0,5 \text{ J}/\text{cm}^2$ . Vlnové délky větší než vlnová délka  $\lambda_B$  mřížkou procházejí, kdežto kratší vlnové délky jsou vyvázaný do pláště, jak je tomu u leptaných nebo reliéfních vláknových mřížek. U těchto mřížek existuje hranice  $650 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  nad jejíž hladinu se vyvolané změny indexu lomu dramaticky zvyšují. Pod touto prahovou hranicí se index lomu mění lineárně s hustotou energie. Při použití mikroskopu je patrné fyzické poškození v jádře vlákna, které je unikátní pro tento typ mřížek. Právě toto fyzické poškození způsobuje velké změny indexu lomu. Mřížky typu II vykazují vysokou teplotní stabilitu. Při teplotě  $800^{\circ}\text{C}$  po dobu 24 hodin nebyla u těchto mřížek zaznamenána žádná trvalá změna. Většina mřížky zmizela až při teplotě  $1000^{\circ}\text{C}$  po 4 hodinách. Jednou z nejvíce atraktivních vlastností tohoto typu mřížek je doba rychlosti zápisu mřížky do vlákna, která se rovná trvání jednoho pulzu (jednotky nanosekund).

### **2.3 Techniky výroby vláknových mřížek**

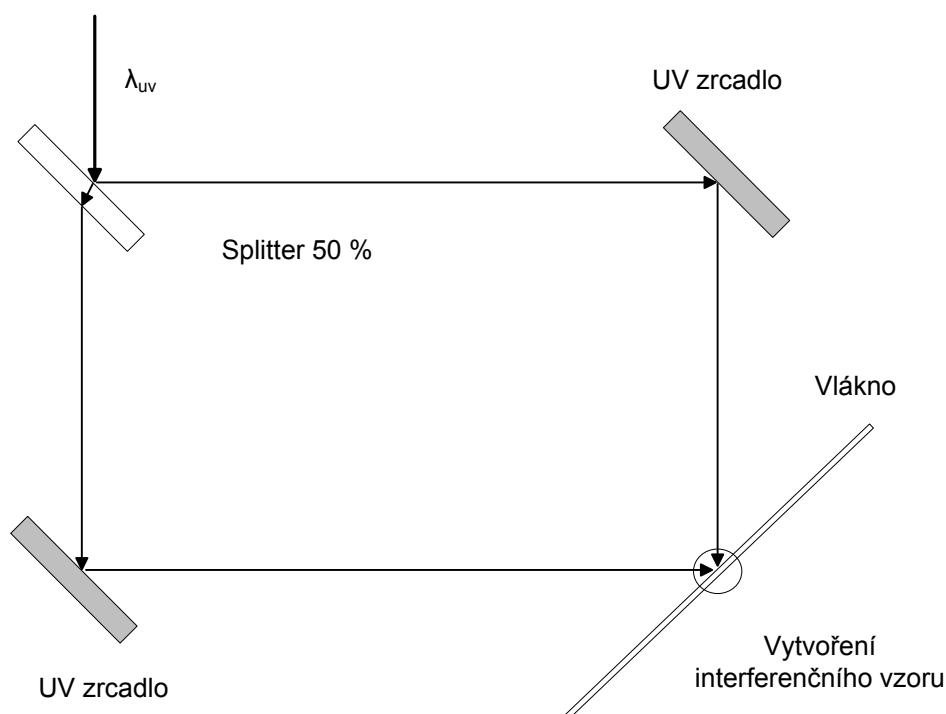
Pro výrobu mřížek existuje několik metod, jako jsou vnitřní zápis, holografické metody až po neinterferometrické. Jelikož je fotocitlivost daleko vyšší v ultrafialové oblasti světla, metoda vnitřního zápisu se již nepoužívá. Vnitřním zápisem lze vyrábět jen mřížky s Braggovskou rezonanční vlnovou délkou, která koresponduje právě s vlnovou délkou použitého laseru.

Metody zápisu s vnější, tedy boční expozicí UV záření, jsou pro výrobu mřížek daleko výhodnější. Při této technice se nejčastěji uplatňuje osvit paprskem, který je rozdělen na dva svazky interferující v místě vlákna, kde se vytvoří struktura mřížky. Tohoto rozdělení svazku a jeho následné interference se dosahuje pomocí fázové masky nebo splitteru. Metoda bod po bodu představuje jeden z interferometrických způsobů výroby mřížky. Používá se bodového bočního svitu na vlákno, které je posunováno a vzdálenost posunu odpovídá periodě mřížky.

Mřížky vyráběné bočním zápisem překonávají omezení mřížek, které se vyráběly vnitřním zápisem. Metody na jejich výrobu jsou ale mnohonásobně technologicky náročnější.

### 2.3.1 Interferometrická metoda

Je založena na použití interferometru, který rozdělí UV paprsek na dva svazky, které mají stejný výkon. Tyto svazky se posléze promítnou na fotocitlivé vlákno, kde interferují a vytvářejí interferenční obrazec, u kterého se periodicky střídají maxima a minima, jak lze vidět na obrázku 2.2. Změnou úhlu se dá měnit perioda mřížky, tedy vzdálenost maxim a minim. Jako paprsek nutný pro tento zápis je nutné použít vysoce kvalitní laserový zdroj, který je vysoce koherentní a má vynikající vlnovou a výkonovou stabilitu. Hlavní nevýhodou tohoto přístupu je velká náchylnost na mechanické vibrace. Méně než mikronové změny pozice zrcadel, interferometru nebo jiných částí při UV ozařování způsobí posunutí interferenčního obrazce, což vede k odstranění mřížky z vlákna [4].

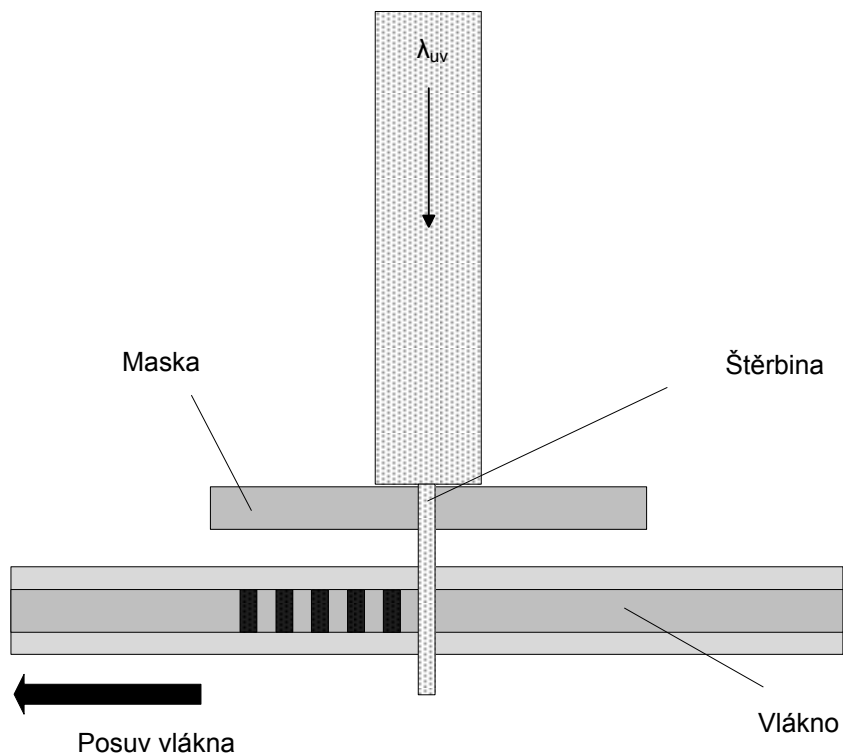


Obrázek 2.2: Schématické vyjádření interferometrické metody

### 2.3.2 Metoda bod po bodu

Metoda pro výrobu mřížky bod po bodu používá výkonný pulzní laser. UV pulz z laseru je pomocí čoček upraven do nerozbíhavého paprsku, který prochází štěrbinou, která jej dále upraví na potřebnou šířku. Takto upravený paprsek ozáří fotocitlivé vlákno a v něm dochází ke změně indexu lomu, jak je tomu naznačeno na obrázku 2.3. Takové vlákno posouváme určitou rychlostí a pomocí změny frekvence pulzů laseru určujeme periodu mřížky. Tato technika je velmi stabilní a precizní i v méně než mikronové oblasti. Hlavní výhoda je, ale ve flexibilitě změny parametrů Braggovské mřížky. Jelikož je struktura mřížky tvořena bod po bodu,

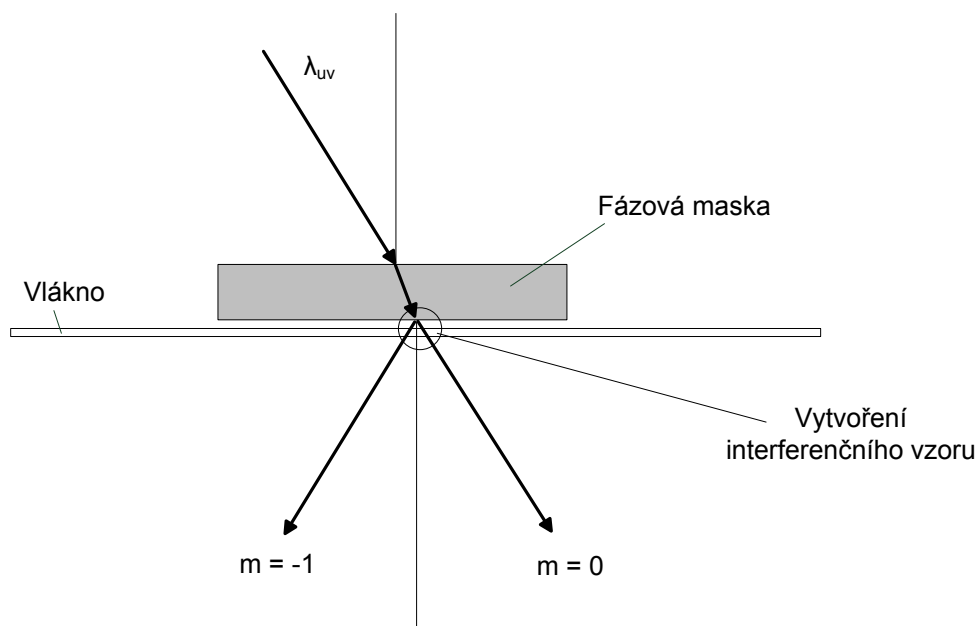
můžeme parametry mřížky upravovat velice snadno. Chirped grating, tedy čirpovaná mřížka s proměnou periodou, se vytvoří snadno jen pomocí změny velikosti pulzu po každém ozáření vlákna. Metoda umožňuje vytváření prostorových a polarizačních módových konvertorů nebo filtrů. Jediná nevýhoda této techniky je ve velké časové náročnosti při vytváření těchto mřížek.



Obrázek 2.3: Znáznornění metody bod po bodu

### 2.3.3 Metoda fázové masky

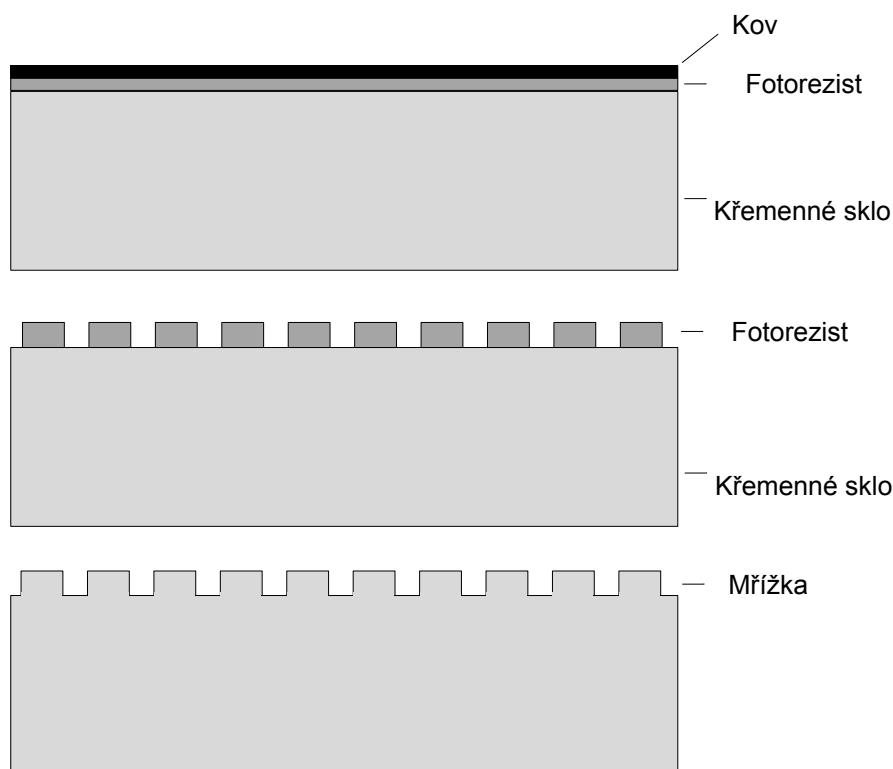
Jedná se o jednu z nejvíce efektivních metod pro vytvoření Braggovské mřížky do vlákna citlivého na UV záření. U této metody se používá difrakční optický element, jímž je právě fázová maska, což je průhledná forma, na níž je vytvořen reliéf optické mřížky. Reliéf optické mřížky zajišťuje opoždění záření v členění mřížky  $180^\circ$ . Takže světlo, které projde skrz tento reliéf, interferuje a vytváří místa s velkou a nízkou intenzitou vzdálené od sebe polovinu periody mřížky na masce. Tyto místa dopadu se nazývají difrakční řády a na obr. 2.4 jsou zobrazeny jako  $m = -1$  a  $m = 0$ . Fázová maska může být vytvořena jak holograficky tak pomocí elektronové litografie. Výroba takovéto masky je nákladná a pro různé typy mřížek je nutné vytvořit vždy specifickou masku [3].



Obrázek 2.4: Schématický diagram metody fázové masky

#### 2.3.3.1 Výroba fázové masky

Je možné použít dvě metody pro výrobu fázové masky a to elektronovou litografií nebo holografickou expozicí. V případě elektronové litografie se maska vytváří tím, že se na destičku z křemenného skla nanese vrstva fotorezistu, na který se potom pomocí svazku elektronů zapíše vzor v podobě více čar s požadovaným rozestupem. Fotorezistem nejčastěji bývá dvouvrstvý negativní rezist s tloušťkou okolo 500 nm, na který se ještě nanáší tenká vrstva kovu. Tato vrstva je po celém procesu expozice odstraněna pomocí alkalického roztoku. Expozice vytvrdí určité části fotorezistu a zbylý tedy neexponovaný fotorezist je odplaven. Fotorezist, který byl vytvrzen, následně slouží jako maska při procesu leptání požadované struktury do křemenné desky. Po celém procesu leptání se odstraní i zbytky rezistu. Výroba takové masky je znázorněna na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: *Znázornění postupu výroby fázové masky*

Expozice se zpravidla používá na menší oblast 0,5x0,5 mm z důvodu přesnosti. Tímto procesem se udělá část masky, poté se substrát posune a pokračuje se na další části masky. Obraz masky se tedy skládá z více segmentů. Největším problémem je u této technologie spojování těchto segmentů kvůli náhodným změnám periody masky v místech spojů. Celý proces expozice u dlouhých masek může trvat až několik hodin. Proto je nezbytné dodržovat přesnou referenční soustavu a to hlavně teplotní stabilitu z důvodů spojování samotných segmentů. Tento problém spojování segmentů odpadá při výrobě masky pomocí holografické metody. Holografická metoda je kvalitnější možností výroby fázové masky, avšak problémy jsou i u této metody. Hlavním problémem je dodržení homogenity osvitů a také potřeba velkých zrcadel. To může znamenat problémy při sériové produkci pro výrobu identických fázových masek.

## 2.4 Typy Braggovských mřížek

### 2.4.1 Uniformní mřížky

Jedná se o nejjednodušší formu FBG, kde je změna indexu lomu a perioda těchto změn konstantní. Tyto změny mají tedy stejnou periodu opakování a jsou kolmé k ose vlákna. Lze je považovat za základní stavební prvek většiny Braggovských mřížkových struktur. Světlo, které je vedeno podél jádra optického vlákna, bude rozptýleno na každé rovině mřížky. Jestliže není splněna Braggovská podmínka, bude světlo odražené od každé následující roviny postupně odraženo, až se nakonec vyruší. Kromě toho světlo, které není shodné s Braggovskou

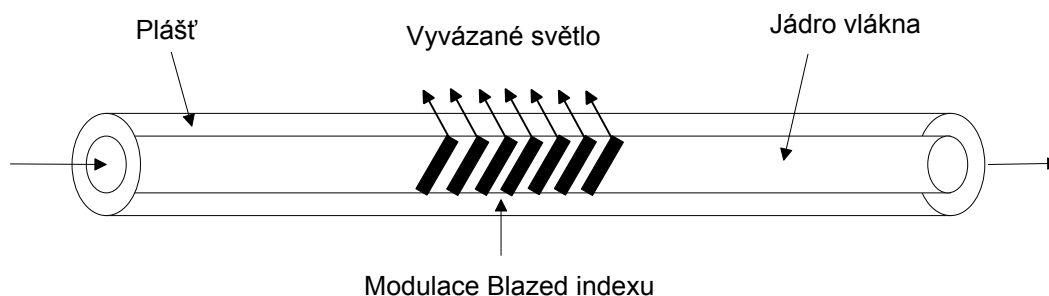
rezonanční vlnovou délkou  $\lambda_B$  bude mít velmi malý odraz na každé z mřížkových rovin vzhledem k neodpovídajícímu indexu. Tento odraz se hromadí po celé délce mřížky. Je-li splněna Braggovská podmínka, je odražené světlo z jednotlivých rovin mřížky vráceno nazpátek a vytvoří vrchol, který odpovídá centrální vlnové délce mřížky.

#### 2.4.2 Apodizované mřížky

Hlavní vrchol odrazu spektra konečné délky Braggovské mřížky s uniformní modulací indexu odrazu je doprovázen řadou postranních laloků na vedlejších vlnových délkách. V některých aplikacích je důležité snížit, pokud je to možné i eliminovat odrazivost těchto postranních laloků apodizací reflexního spektra mřížky. Apodizaci lze popsat jako postupné zmenšování změn indexu lomu na koncích mřížky. Použit se dají například v hustém vlnovém multiplexu (DWDM), kde je důležité mít velmi velké odmítnutí nerezonančního světla kvůli odstranění přeslechů mezi informačními kanály a proto tu je použití apodizace absolutně nezbytné. V praxi se apodizace provádí změnou amplitudy, kdy dochází ke změně indexu lomu podél délky mřížky, kde největší hodnoty indexu jsou ve středu a nejmenší na krajích.

#### 2.4.3 Blazed mřížky

Nakloněná rovina Braggovských mřížek v úhlu k ose vlákna má za následek, že světlo, které je jinak vedeno v jádru vlákna, bude vyvázáno, viz obrázek 2.6. Perioda mřížky a velikost indexu lomu určuje spektrum odražené vlnové délky. Úhel roviny samostatné mřížky nám pak určuje množství vyvázaného odraženého záření z jádra vlákna do jeho obalu [1].

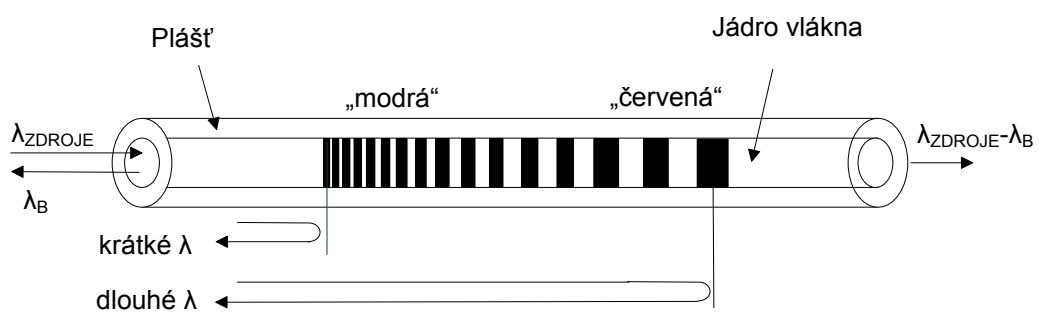


Obrázek 2.6: Schématické diagram blazed mřížky

#### 2.4.4 Chirped mřížky

Další možností jak měnit vlastnosti mřížek a rozšířit tak jejich možné použití je změna periody mřížky v závislosti na poloze. Vytváření změn periody uvnitř mřížky se nazývá chirp a vede ke změnám ve spektrální odezvě mřížky. Chirpovanou mřížku lze tedy chápat jako několik různých mřížek, které jsou řazeny sériově, jak je tomu ukázáno na obrázku 2.7. Při použití mřížky s lineárním profilem chirpu je průběh skupinového zpoždění v rozmezí odražené šířky pásma přibližně lineární a této vlastnosti se používá pro kompenzaci chromatické disperze.





Obrázek 2.7: Schématické diagram chirped mřížky

### 3 Využití FBG jako senzoru

Braggovské mřížky jsou citlivé jak na strain (deformaci, taktéž mechanické napětí), tak na teplotu. To znamená, že FBG mohou být použity jako snímací prvky optovláknových senzorů. Deformace ovlivňuje odezvu FBG přímo a to prostřednictvím expanze nebo komprese velikosti mřížky což vede ke změně indexu lomu, avšak v senzorce se využívá účinku mechanické deformace, která ovlivňuje velikost  $\Lambda$ , čímž se posouvá  $\lambda_B$ . Citlivost FBG na změnu teploty je způsobena hlavně prostřednictvím vlivu teploty na změnu indexu lomu a v menším rozsahu také teplotní roztažnosti vlákna. Vztah pro změnu velikosti Braggovy rezonanční vlnové délky  $\Delta\lambda_B$  v závislosti na deformaci  $\varepsilon$  a změně teploty  $\Delta T$  je dán:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T, \quad 3.1$$

kde  $P_e$  je optický koeficient deformace,  $\varepsilon$  je axiální deformace,  $\alpha$  je koeficienty tepelné roztažnosti  $\zeta$  je termo-optický koeficient. Normalizovaná odezva deformace při konstantní teplotě je

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = 0,78 \times 10^{-6} \mu\varepsilon \quad 3.2$$

a normalizovanou teplotní závislost při konstantní deformaci popisuje vzorec

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 6,678 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}. \quad 3.3$$

#### 3.1 Vyšetřovací techniky

Snímání hodnot je založeno na principu, že měřený údaj je přímo úměrný vlnové délce odražené na Braggovské mřížce. Posun vlnové délky obsahuje tedy informaci o měřené veličině. Z tohoto důvodu je primární práce pro senzory FBG správné vyšetření vlnových výsledků z Braggova odrazu. Jednoduchý způsob realizace je použití spektrometru nebo monochromátoru, avšak jejich používání je nepraktické vzhledem k jejich omezené rozlišovací schopnosti, velikosti, nedostatku odolnosti a také vysoké ceně.

Přesné měření vlnové délky FBG senzorů byl náročný problém kvůli rané fázi ve snímání FBG. Měření vlnové délky také není jednoduché a tak se provádí změna vlnové délky na nějaké snadněji měřené veličiny, jako jsou amplituda, frekvence nebo fáze.

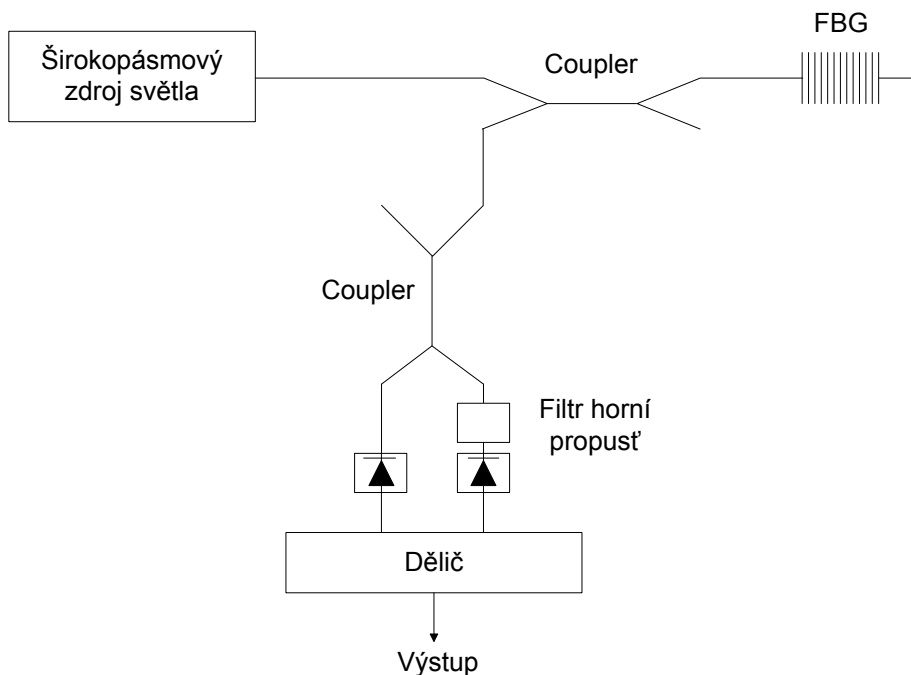
##### 3.1.1 Konverze vlnové délky - amplituda

Měření amplitudy je v optické senzorce nejběžnějším měřením. Převod posunu vlnové délky na amplitudové změny je nejjednodušší a také nejefektivnější vyšetřovací technika. Existuje více vyšetřovacích postupů:

###### 3.1.1.1 Hranový filtr

Poskytuje lineární vztah mezi posunutím vlnové délky a změnou výstupní intenzity filtru. Typické schéma používající hranový filtr je ukázáno na obrázku 3.1. Odražené světlo od FBG

mřížky je rozděleno na dva paprsky o stejné intenzitě. Jeden paprsek je filtrován před samotnou detekcí. Druhý paprsek používaný jako referenční je nefiltrovaný a detekovaný. Oba dva tyto výstupy jsou následně zesíleny a přivedeny na vstupy analogového děliče. Poměr filtrovaného paprsku vůči referenčnímu pak poskytuje informaci o vlnové délce bez jakékoliv odchylky intenzit, ať již vlivem kolísání výkonu zdroje nebo ztrátám na spojích optických vláken.



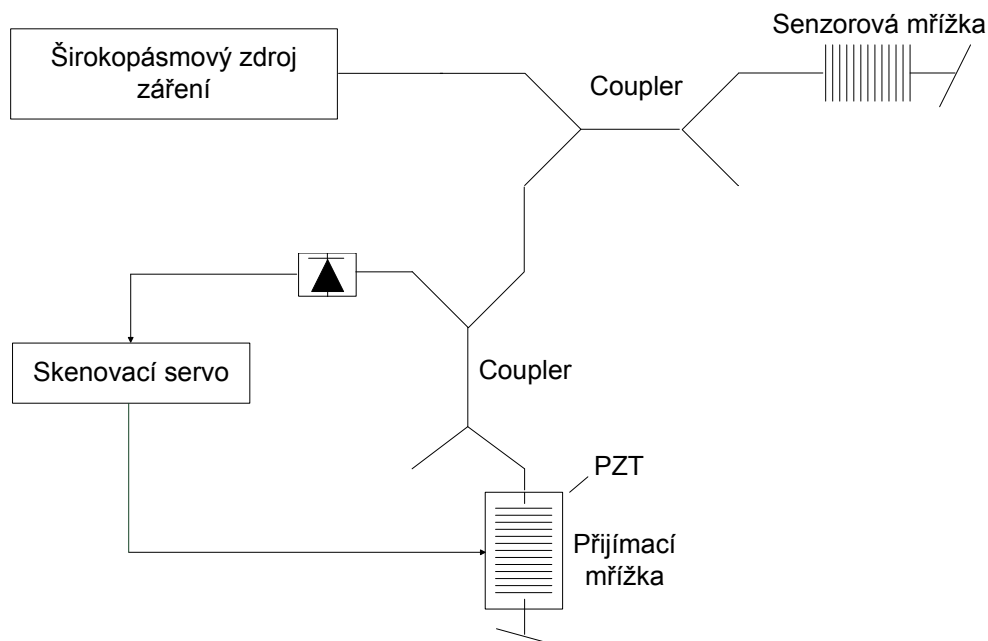
Obrázek 3.1: Schéma vyhodnocování pomocí hranového filtru

Tento přístup poskytuje jednoduché a levné řešení pro měření posunu vlnové délky působením FBG senzorů. Nicméně tato metoda má omezené rozlišovací schopnosti měření. Systém znázorněný na obrázku 3.1 používá infračervený filtr horní propusti, který poskytuje lineární rozsahy od 815 nm do 838 nm při rozlišení přibližně 1% pro měření v plném rozsahu.

#### 3.1.1.2 Přizpůsobené vláknové mřížkové filtry

Základní koncepce systému, která je založena na metodě přizpůsobení vláknové mřížky, je znázorněna na obrázku 3.2. Světlo ze širokopásmového zdroje je zavedeno do senzorové mřížky skrz vláknový coupler. To se šíří zpět k přijímací mřížce, která je namontována na piezoelektrický rezonátor. Přijímací mřížka je vyrobena tak, aby její Braggovská vlnová délka byla shodná se senzorovou mřížkou. Centrální vlnová délka senzorové mřížky se bude v přímé úměře měnit k měřené veličině a nebude odpovídat vlnové délce přijímací mřížky. Pokud se centrální vlnová délka přijímací mřížky posune přes definovaný rozsah při použití piezoelektrického převodníku (PZT), pak v jednom místě natažení PZT dojde k odrazení vlnové délky, která bude na obou mřížkách shodná. V tomto stavu bude zpětně odražený signál od přijímací mřížky maximální a detekovaný na fotodiodě. Když je znám vztah mezi řídicím napětím a vlnovou délkou přijímací mřížky, je možné určit okamžitou hodnotu vlnové délky

na sensorové mřížce. Uzavřená servo smyčka se používá k udržování výše popsaného stavu a to tak, že sleduje posun vlnových délek na sensorové mřížce. Možné rozlišení je dáno šířkou spektra použitých mřížek. Pro mřížky se šířkou spektra 0,2 nm je hodnota napětového rozlišení přibližně 4,1  $\mu\epsilon$  a pro hodnotu 0,05 nm je to 1  $\mu\epsilon$ . V případě otevřené smyčky může být tato technika použita pro demodulaci multiplexních FBG sensorových polí.

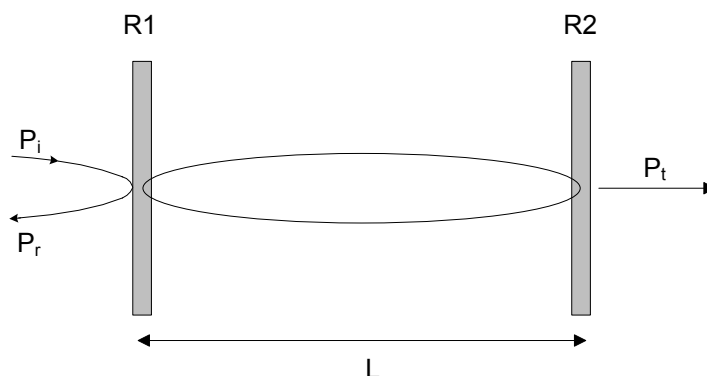


Obrázek 3.2: Vyšetřovací technika založená na přizpůsobeném vláknovém filtru

### 3.1.1.3 Vláknový Fabry-Perotův filtr

Fabry Perotův interferometr (FPI), který se někdy nazývá etalon, se skládá ze dvou zrcadel s odrazivostí R1 a R2, které jsou odděleny dutinou o délce L jak lze vidět na obrázku 3.3. Od svého vynálezu na konci 19. století, je FPI široce používáno pro spektroskopii ve vysokém rozlišení. První výsledky při použití ve vláknové optice, byly prezentovány v počátcích osmdesátých let. Koncem osmdesátých let se FPI začal používat ke snímání teploty, napětí a ultrazvukového tlaku v kompozitních materiálech. Touto ranou prací byly položeny základy pro výzkum a vývoj, což vedlo ke komercializaci a následnému rozvoji v průběhu devadesátých let. Vláknový Fabry Perotův interferometr je velmi citlivý na odchylky, které mají vliv na délku optické dráhy mezi oběma zrcadly [3].

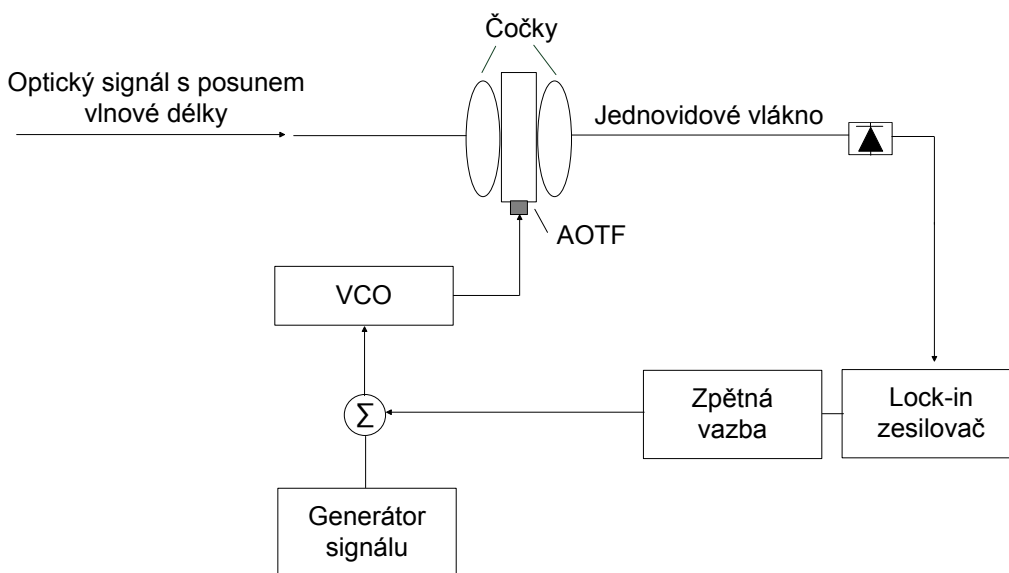
Pro tento princip se používá úzkopásmový filtr, který pracuje v pásmu FBG s piezoelektrickým laděním. V tomto systému je možno použít serva uzavřené smyčky pro sledování posunu vlnové délky snímací mřížky. Při použití otevřené smyčky může být systém provozován v režimu skenování, kde dochází ke sledování vlnové délky více snímačů. Princip fungování je stejný jako u metody přizpůsobené vláknové mřížky. Tohoto se používá pro detekci posunu vlnové délky a to odrazem nebo přenosem na FBG senzoru.



Obrázek 3.3: *Fabry Perotův interferometr*

### 3.1.2 Konverze vlnové délky - frekvence

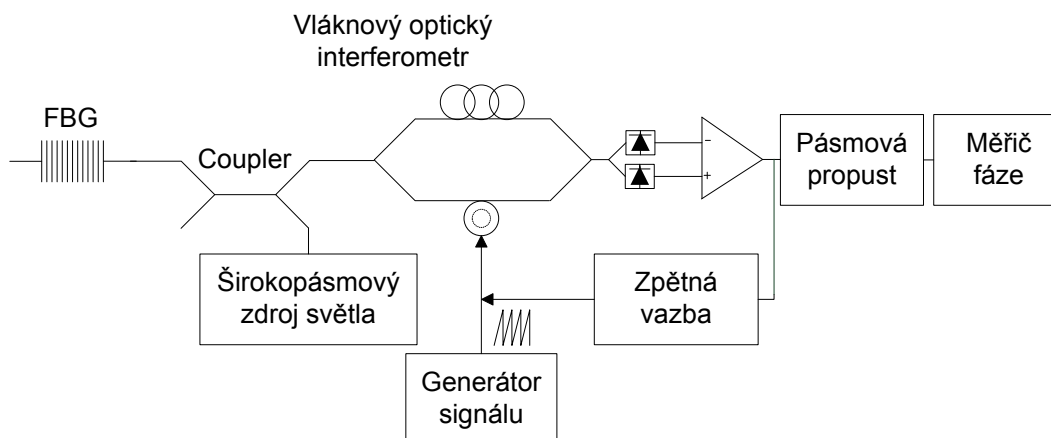
Akusticko-optické laditelné filtry (AOTF) pracují na propustnosti vlnových délek vzhledem k použité ovládací rádiové frekvenci (RF). Jakýkoliv posun vlnové délky může být sledován pomocí odchylky použité RF. Pokud se střední vlnová délka filtru neshoduje s naměřenou vlnovou délkou, tak zpětnovazební systém ohlásí chybný signál a použije napěťově řízený oscilátor (VCO) k nastavení správné frekvence, viz obrázek 3.4. V novějších verzích se kódovaný odraz vlnové délky rozdělí na dvě části. První část prochází skrz AOTF a druhá je zavedena přímo do druhého detektoru. Následně jsou signály z obou detektorů porovnány a poskytují nám chybový signál, který slouží jako zpětná vazba pro AOTF, takže AOTF sleduje vlnovou délku. Rozlišení vlnové délky 2,62 pm koresponduje s napětovým rozlišením 2,24  $\mu\text{V}$ .



Obrázek 3.4: *Schéma použití akusticko-optického laditelného filtru*

### 3.1.3 Konverze vlnové délky - fáze

Nevyvážené optické vlákno Mach-Zehnderova interferometru se použije jako diskriminátor vlnových délek pro zjišťování posunu vlnové délky na FBG senzoru. Pro jeden mřížkový senzor se používá širokopásmový zdroj, jak je to znázorněno na obrázku 3.5. Odraz kódované vlnové délky z mřížky se přivádí do interferometru prostřednictvím spojky a proto se tento Braggovský odraz chová jako zdroj modulace vlnové délky.



Obrázek 3.5: Schéma pro konverzi vlnové délky na fázi

Závislost vlnové délky na výstupu interferometru může být vyjádřena následovně

$$I(\lambda) = A [1 + k \cos(\psi(\lambda))], \quad 3.4$$

pro které  $\psi(\lambda) = 2\pi nd/\lambda$ ,  $\lambda$  je vlnová délka odraženého světla z mřížky senzoru,  $A$  je úměrné vstupní intenzitě a ztrátám na systému,  $d$  je délka odchytky mezi dvěma rameny,  $n$  je efektivní index lomu jádra u vlákna a  $k$  je interferenční rušení. Pro dynamickou modulaci vlnové délky Braggovského odrazu je změna fázového posunu  $\Delta\psi(\lambda)$  dána vztahem

$$\Delta\psi(t) = - \frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda \sin\omega t. \quad 3.5$$

Při použití interferometrického senzoru dosahujeme vysokého rozlišení dynamické fázové detekce a to  $10^{-6} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Při délce nevyvážení 10 mm, indexu lomu 1,45 a vlnové délce 1550 nm jsme schopni získat detekovaný posun vlnové délky  $2,6 \times 10^{-5} \text{ pm}$ .

Pro statické nebo pseudostatické posuny vlnové délky se navrhuje používání techniky pseudo heterodynu, která spoléhá na generaci elektrického nosného signálu na výstupu použitím fáze pilového signálu na piezoelektrický převodník v jednom z ramen vlákna. Změna ve fázovém posunu může být popsána vztahem

$$\Delta\psi(t) = - \frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda + \frac{2\pi n}{\lambda} d(t), \quad 3.6$$

kde  $d(t)$  je dynamická délka nevyvážení nastavené piezoelektrickým převodníkem. Nastavením fázové odchytky trojúhelníkového náběžného signálu v blízkosti  $2\pi$  bude výstupní



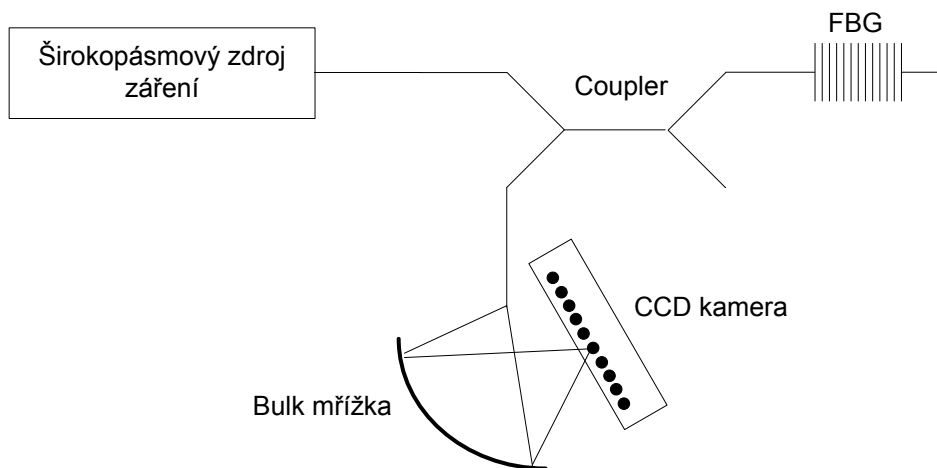
signál rozdílového zesilovače po filtraci pásmovou propustí v základním kmitočtu trojúhelníkové modulace vyjádřen jako

$$S(\lambda) = A \cos(\omega t + \Delta\psi(\lambda)). \quad 3.7$$

Pro nerovnováhu délky 10 mm při obvyklém fázovém rozlišení  $0,01^\circ$  je posun vlnové délky  $4,5 \times 10^{-3}$  pm. Demodulační techniky pro dynamické nebo statické vlnové posuny jsou odlišné, avšak pro obě techniky se využívá optických interferometrů. U měření dynamických posunů vlnové délky převádí interferometr posun vlnové délky ve změny optické fáze. Pro statické posuny vlnové délky je měřenou veličinou změna elektrické fáze. Obecně lze říci, že optická interferometrie nabízí mnohem vyšší rozlišení než je tomu u jiných vyšetřovacích technik.

#### 3.1.4 Konverze vlnové délky - umístění

Princip této vyšetřovací techniky je shodný s tím, který se používá ve spektrometrii. V tomto systému se využívá pevný disperzní prvek (mřížka nebo hranol), který rozděluje různé vlnové délky na různá místa podél zobrazovaného pole detektorového prvku. Odraz od FBG snímače je přiveden do optické bulk mřížky. Světlo se při různých vlnových délkách ohýbá v různých směrech podél přímky. Lineární kamera (CCD) je použita tak, že světlo lišící se vlnovou délkou bude promítáno na jinou pozici CCD, jak lze vidět na obrázku 3.6. Rozlišení této metody je závislé na prostorovém řešení bulk mřížky a také na počtu pixelu CCD.



Obrázek 3.6: Schéma FBG senzoru a použití disperzního zařízení spolu s CDD kamerou

#### 3.1.5 Konverze vlnové délky - čas

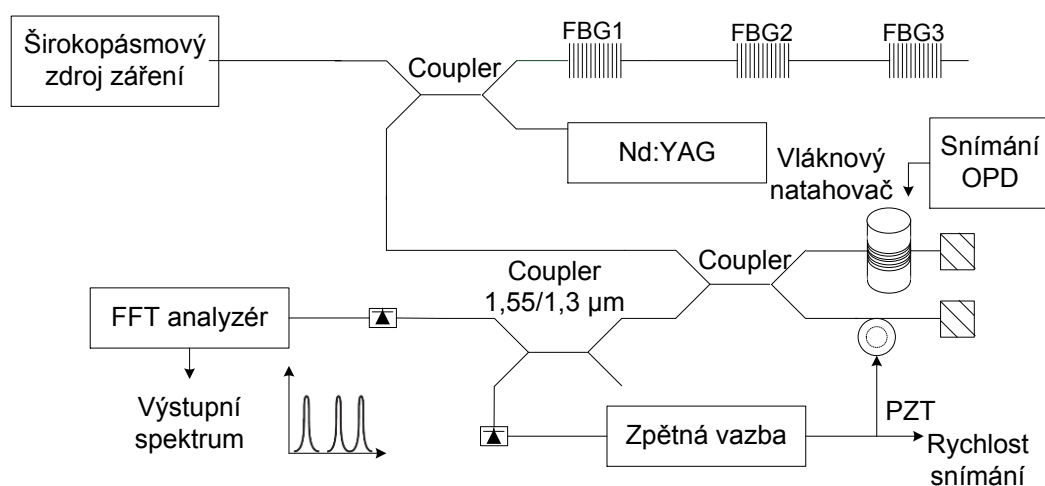
Využívá se disperzního optického zpožďovacího vedení, které provádí převod posunu vlnové délky na čas. Širokopásmové, ultrakrátké pulzy generované erbiem dopovaným vláknovým laserem jsou navedeny do FBG senzorů skrze disperzní vlákno. Odrazy z jednotlivých mřížek jsou šířeny zpět disperzním vláknem a jsou sledovány rychlým fotodetektorem a vzorkovacím

osciloskopem. Vysoký rozptyl disperzního vlákna převádí posun vlnové délky na posun v čase přijetí impulsu na detektoru.

### 3.1.6 Fourierova transformace

Jedná se o přístup, kde je odraz světla od FBG mřížky naveden do vyváženého optického vlákna Michelsonova interferometru. Vlákně, které řídí piezo natahovač, je vloženo do jednoho z ramen interferometru. Pro řízení optického vláknového natahovače se používá trojúhelníkový signál. Slouží k získání rozdílu optické dráhy (OPD), a to až do délky 30 cm prostřednictvím skenování skrz nulovou pozici OPD. Na výstupu symetricky kolem nuly OPD je generován interferogram. Šířka interferogramu závisí na koherenční délce světla vstupujícího do interferometru, která je spojena s šířkou pásma Braggovské mřížky. Fourierova transformace interferogramu je realizována přiváděním jeho výstupu do elektrického spektrálního analyzátoru. Kmitočet, při kterém se objeví proužky na výstupu Michelsonova interferometru, je přímo úměrný změně rychlosti OPD v interferometru. Jelikož je optické spektrum Braggovské mřížky vyjádřeno jako elektrické kmitočtové spektrum, tak posun vlnové délky může být monitorován měřením příslušné změny frekvence.

Rozlišení při měření vlnové délky je limitováno efektivní šířkou pásma což je srovnatelné s tím v FBG. V tomto případě se tato hodnota vztahuje k maximálnímu možnému snímání OPD z jeho nulové polohy. Laser Nd:YAG pracuje na 1,32  $\mu\text{m}$  a poskytuje referenční optický signál pro správnou rychlost snímání skrz zpětnou vazbu systému. To zaručuje linearitu snímání. Dvě Faradayova rotační zrcadla (FRM) se používají k odstranění efektu polarizace v optickém interferometru, jak lze vidět na obrázku 3.7. Rozlišení vlnové délky v měření je omezeno efektivní šířkou pásma stejně jako je tomu u FBG. V tomto případě je to hodnota maximální dostupné OPD z nulové pozice. Efektivní koherenční délky typického Braggovského vlákna 1550 nm je  $\sim 0,5$  až 1 cm pro šířku pásma 0,2 až 1 nm. Z tohoto důvodu musí být OPD kontrolováno pro hodnotu větší než je 2 cm. Pro systém s maximálním snímáním 10 cm je spektrální rozlišení  $0,07 \text{ cm}^{-1}$ .



Obrázek 3.7: Použití Fourierovy transformace

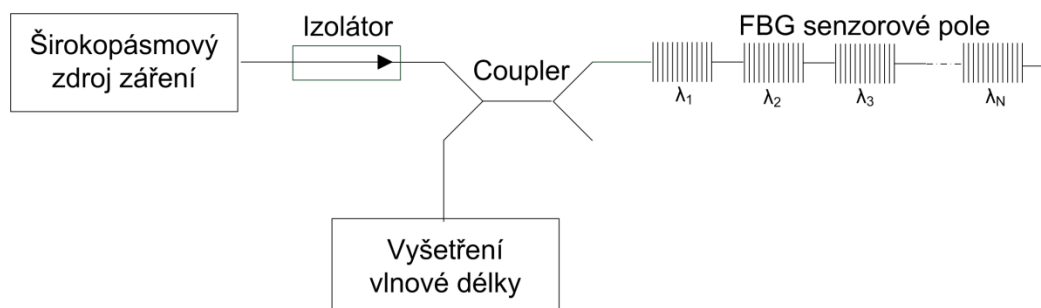
## 3.2 Multiplexní techniky

Multiplexování je proces, který nám umožňuje použít větší počet senzorů pro jeden vyšetřovací detektor. Multiplexní přenos slouží k redukci počtu vedených vláken a také konektorů. FBG senzory mají obrovskou výhodu nad ostatními senzory díky jejich jednoduchosti, mají vnitřní snímací povahu, která může být zapsána do vlákna a více senzorů může být použito v jednom optickém vláknu. Existuje více návrhů multiplexních přenosů pro optická vlákna. Multiplexingu lze dosáhnout v oblastech času, vlnové délky, prostoru, frekvence nebo fáze. Nejpoužívanější techniky pro FBG jsou použitím časového a vlnového multiplexování.

### 3.2.1 WDM

Wavelength division multiplexing, tedy vlnový multiplex, je nejjednodušší technika pro multiplexování FBG senzorů využívající vlnové délky. Základní princip je založen na změně vlnových délek senzorů Braggových mřížek při změně deformačního nebo teplotního působení. Každá mřížka senzoru je vytvořena pro jedinečnou Braggovu vlnovou délku  $\lambda_B$ , která umožňuje identifikaci každého senzoru ve vlákne s více senzory. Rozdíly mezi těmito vlnovými délkami jsou dány šířkou pásma světelného zdroje a také deformačním rozsahem. Tímto je limitován počet senzorů, který je možno připojit k jedinému vláknu. Se zvyšujícím se počtem senzorů je tedy nutné omezovat šířku spektra přiděleného jednotlivým FBG z důvodu omezeného spektrálního rozsahu zdroje [5].

Základní WDM konfigurace, viz obr. 3.8 je tvořena senzorovým polem, které je vytvořeno v jednom optickém vláknu a je osvětlené široko pásmovým světelným zdrojem. Optický signál odražený od FBG senzorového pole je veden do vyšetřovacího systému. V rané fázi byl k tomuto použit Fabry-Perotův filtr, který sloužil k rozlišení vlnových posunů mezi snímači. Ve vyhodnocovacím systému můžeme použít jak paralelního tak sériového zapojení. Paralelní technologie se používá pro současné vyšetření všech senzorů ve WDM. V tomto zapojení každý filtr dostává jen  $1/2N$  optického výkonu jako výsledek použití  $1 \times N$  vláknového splitteru a vazebního vlákna. Použití více FBG senzorů vede k větším výkonovým propadům [1]. Sériově přizpůsobené FBG pole umožňuje lepší využití optického výkonu než je tomu v paralelní technologii. V novějších sériových schématech se používá systém, kde je přenos totožných FBG používán k monitorování změny vlnové délky pro odpovídající snímání FBG a tím je umožněna redukce výkonového snížení [2].

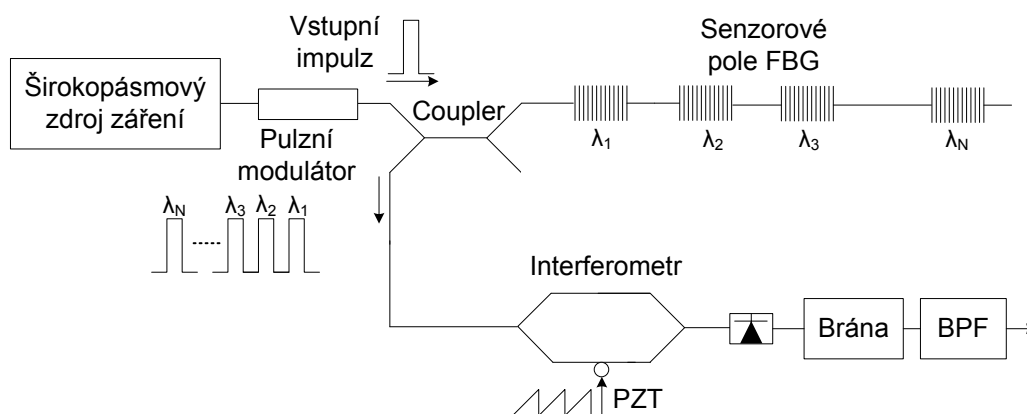


Obrázek 3.8: Systém používající WDM pro senzorové pole

V poslední době je hodně pozornosti věnováno řešení problému detekce vlnové délky, kdy dochází k překrývání těchto spekter, toto se používá pro zvýšení počtu senzorů. Překrývání spekter může působit vážné přeslechy mezi jednotlivými snímači a technika CPD (konvenční detekce vrcholů) se stává nevhodnou v důsledku chyb v detekci vlnové délky. Existuje však řada metod řešení tohoto problému. Používají se různé evoluční algoritmy (EA), jako jsou například genetický algoritmus (GA), multi-swarm částicový swarm optimalizér (DMS-PSO) a self-adaptabilní okolí prohledávající diferenciální evoluce plus (SaNSDE+). Těchto algoritmů lze použít při částečném nebo úplném překrývání spekter FBG. V poslední době se však většina studií zaměřuje hlavně na paralelní topologie [5].

### 3.2.2 TDM

Časový multiplex použitý pro FBG senzory pracuje na vracení impulzů mezi přilehlými FBG, kde je možné použít různých vzdáleností mezi mřížkami. Tímto se odražené pulzy z jednotlivých mřížek vracejí s rozdílným časovým zpožděním. Pulz ze světelného širokopásmového zdroje je poslán do vlákna obsahujícího FBG sensorové pole, které může mít různé maximální odrazy vlnových délek ve vlákne dle nastavení systému, viz obrázek 3.9[7]. Šířka vstupního pulzu musí být stejná nebo menší, než je obousměrné zpoždění mezi dvěma mřížkami. Zpětné odrazy na výstupu z mřížek jsou pak od sebe odděleny v čase. Jako detektor můžeme použít Mach-Zehnderův interferometr, který pracuje jako detektor posunu vlnové délky [3].



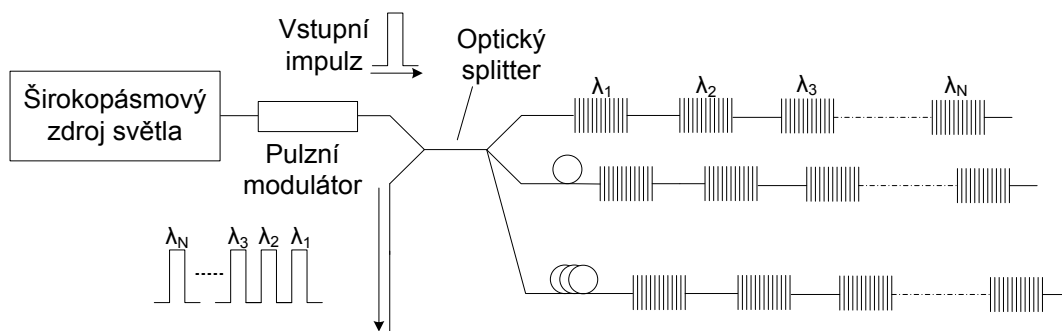
Obrázek 3.9: Schéma TDM s použitím interferometru

### 3.2.3 WDM/TDM

WDM umožňuje použití desítek FBG senzorů na jedno vlákno, avšak TDM může toto číslo násobit až několikrát opakovaným znovupoužitím vlnové délky spektra zdroje. Tento způsob multiplexování se používá v sériové konfiguraci, kde je několik WDM mřížkových polí zřetězeno, každý ve větší vzdálenosti podél vlákna. FBG jsou vyráběny s nízkou odrazivostí. Krátký pulz světla z širokopásmového zdroje bude odražen na mřížkách a tyto odrazy se vrátí do detektoru postupně s různým časovým zpožděním. Detekční elektronika je navržena tak,

aby reagovala na odražené signály pouze během vybraného časového intervalu tak, aby byla zvolena jen jedna sada WDM senzorů pro detekci.

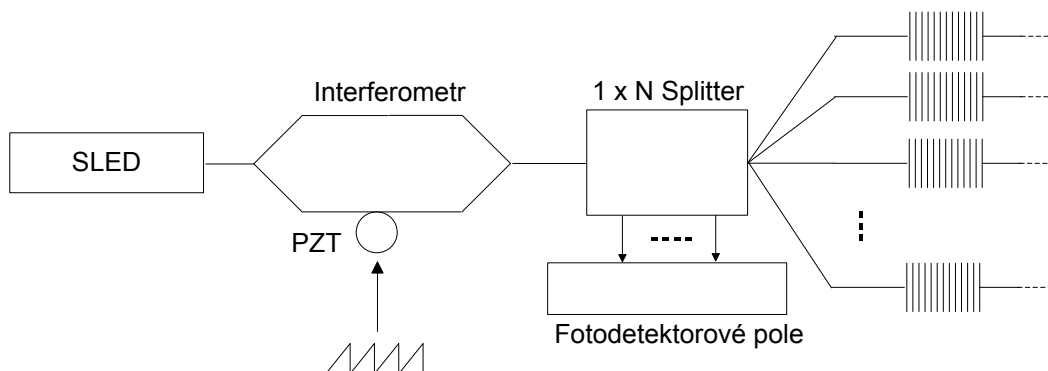
V sériové konfiguraci vznikají přeslechy z efektu vícenásobného odrazu mezi FBG, které mají stejnou Braggovskou vlnovou délku. Paralelní uspořádání znázorněné na obrázku 3.10 eliminuje tento účinek. Vstupní impuls je rozdělen do sensorových polí FBG. Určitá délka zpožďovacího vlákna nám odděluje časové okno pro každou sadu WDM. Celková optická účinnost je však snížena v důsledku použití optického splitteru [3].



Obrázek 3.10: Paralelní konfigurace WDM/TDM topologie

### 3.2.4 SDM

Prostorový multiplex je používán v aplikacích, kde je zapotřebí bodového měření, jako jsou letecký průmysl a bezpečnostní systémy. Pro tyto aplikace je nutné samostatného provozu senzorů a jejich snadné výměny bez nutnosti podstatné rekaliibrace. Sériová zapojení WDM a TDM se prokázala jako nevhodná pro zaměnitelnost jednotlivých senzorů. SDM topologie na základě paralelního zapojení snímačů se ukázala jako ideální volba. Implementace SDM vykazuje zanedbatelné přeslechy mezi jednotlivými senzory. SDM konfigurace je popsána na obrázku 3.11. Jako zdroj světla je použita superluminiscenční dioda. Interferometr slouží jako skener vlnových délek. Všechny FBG mají stejné hodnoty Braggovské vlnové délky a šířky pásma. Odraz z každého kanálu je detekován separovaně. Posun vlnové délky je založen na interferometrickém fázovém měření.



Obrázek 3.11: SDM konfigurace používající optický splitter a fotodetektorové pole

### 3.2.5 SDM a TDM

Byla demonstrována prostorově a časově multiplexovaná topologie s vysokým rozlišením detekce u posunů vlnových délek pro FBG senzorové systémy. Topologie byla složena z osmi mřížek v senzorovém poli a může být rozšířena až na 16 FBG senzorů bez ovlivnění poměru signál-šum pro každý snímač. Tato topologie má oproti sériovým multiplexovacím topologiím mnoho výhod. Rozmezí vlnových délek jednotlivých senzorů může být stejné a není ovlivněno počtem senzorů, které jsou multiplexovány, což minimalizuje náklady na zhotovení FBG mřížek [8].

### 3.2.6 SDM a WDM

Konvenční prostorové multiplexování rozděluje výstupy snímačů do separovaných detekčních kanálů. Zvýšený počet detekčních jednotek je nevýhoda zvyšující hmotnost celého systému a náklady na tento systém. Bylo použito vícekanálového optického vláknového přepínače, umožňujícího separovat senzory do více optických kanálů, které sdílejí stejnou elektroniku při použití jediného Fabry Perotova filtru (FPF) k dosáhnutí jak multiplexování vlnové délky, tak detekci posunu vlnové délky [9]. Pole 60 senzorů s nízkou vzorkovací frekvencí 2,2 sekund je možné použít pro aplikace, kde je rychlost zbytečná, jako jsou různé stavební konstrukce [1].

Tabulka 1.2: Srovnání různých multiplexních technik

|                                 | <b>TDM</b> | <b>WDM</b> | <b>SDM</b> | <b>SDM/WDM</b> |
|---------------------------------|------------|------------|------------|----------------|
| <b>Multiplexovací kapacita</b>  | střední    | dobrá      | dobrá      | velmi dobrá    |
| <b>Prostorové rozlišení</b>     | nízké      | vysoké     | vysoké     | vysoké         |
| <b>Použití optického výkonu</b> | dobré      | dobré      | střední    | dobré          |
| <b>Vyměnitelnost</b>            | nízká      | nízká      | vysoká     | střední        |
| <b>Potencionální cena</b>       | nízká      | střední    | střední    | střední        |

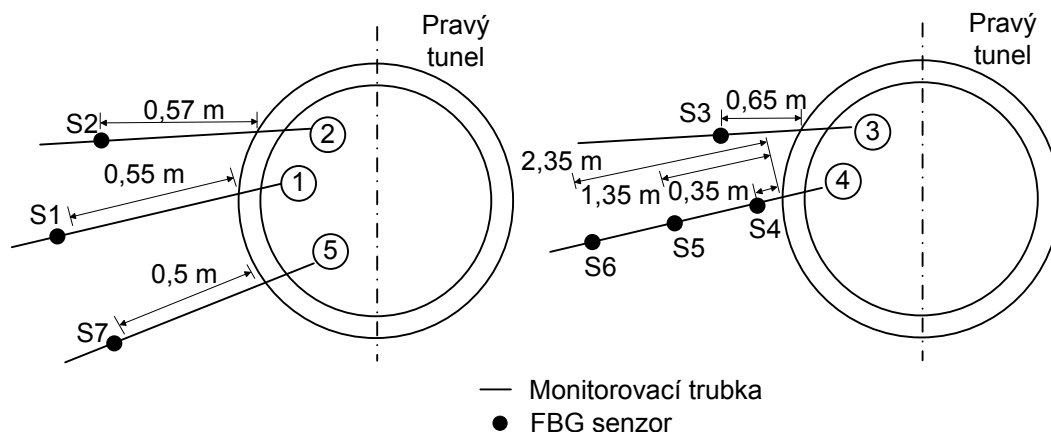
## 4 Aplikace FBG

Vláknové optické senzory (FOS) byly předmětem výzkumu posledních 25 let, i když jejich první představení bylo již před 30 lety. První aplikace byly zaměřeny na armádu a letecké použití. Velký nárůst popularity zaznamenaly tyto senzory v 80. letech. Počátkem 90. let se objevila nová technologie v podobě FBG senzorů, nových interferometrických senzorů a také senzorů založených na distribuovaném Brillouinovu rozptylu. Kromě známých výhod FOS senzorů jako jsou elektromagnetická imunita EMI, malá velikost, dobrá odolnost proti korozi a také dlouhodobá spolehlivost byly nalezeny další výhody u nových optických senzorů tedy u FBG. Tyto senzory nabízejí další výhody v podobě absolutního přímého měření, nízké ceny a jedinečného multiplexování vlnových délek. Tím se vytváří mnoho nových příležitostí a obrovský potenciál pro různé aplikační použití. FBG nacházejí použití zejména v oblasti pro velké kompozitní a betonové stavby, průmysl elektrické energie, medicínu, chemické snímače, ropný průmysl [3].

### 4.1 Velké kompozitní a betonové stavby

Ve srovnání s tradičními elektrickými tenzometry používanými pro monitorování pnutí, mají FOS senzory několik neoddiskutovatelných výhod. Mezi ně patří celková odolnost vůči elektromagnetickému rušení, včetně bouří a potencionální schopnost práce v drsném prostředí, jako jsou například jaderné elektrárny. Mnohem menší velikost (typicky 125  $\mu\text{m}$  v průměru), ideální pro vkládání do kompozitních materiálů aniž by došlo k nějakému významné poruše vlastností struktury [1]. Větší odolnost proti korozi při použití v otevřených konstrukcích, jako jsou přehrady a mosty. Větší kapacita multiplexování a z toho vyplývající velký počet čidel podél jednoho vlákna. Vyšší teplotní kapacita a širší volitelné rozsahy. Velká životnost a spolehlivost těchto senzorů pro doby větší jak 25 let bez degradace výkonu. Využití tyto senzory tedy nacházejí v mostech, přehradách, dolech, tunelech atd. [10].

Čína zažívá za posledních 10 let obrovský železniční boom a plánuje utratit 300 miliard dolarů na postavení 25 000 km vysokorychlostních železnic do roku 2020. V průběhu posledních pěti let bylo dokončeno množství projektů, jako je světově nejdelší vysokorychlostní linka Beijing-Shanghai High-Speed Rail (BSHSR) otevřená pro veřejnost v roce 2011. S rychlým růstem strukturálního monitoringu se uvažovalo jaké technologii použít. Díky výše zmíněným výhodám bylo nasnadě použití FBG. V případě metra Wuham linky 2 o délce 1400 m bylo rozhodnuto o zavedení monitorování pomocí FBG v jedné z pěti propojek mezi dvěma souběžnými tunely. V tomto prostředí vysoké vlhkosti a nízké teploty bylo rozhodnuto vpravit FBG do ocelové trubky. Celkem mezi tunely bylo použito 13 těchto trubek, avšak jen 7 bylo po nainstalování funkčních, jak lze vidět na obrázku 4.1. Ostatní byly zničeny během instalace, poškozením příruby spojující optická vlákna s FBG. Data z těchto měření poskytli zajímavé informace a hlavně dohled nad vypořádáním nosné konstrukce s provozem vysokorychlostní železnice [10].



Obrázek 4.1: Umístění funkčních tyčí s FBG senzory v jednom z tunelů

## 4.2 Elektrické rozvodné sítě

První použití optických vláknových senzorů pro měření elektrického proudu bylo použito v roce 1977. Po více jak dvou desetiletích vývoje vstoupily na trh snímače založené na Faradayově efektu sloužící k měření a zjišťování chyb. FBG může být zapsána na standardní 1550 nm telekomunikační vlákna. Použití dálkových operací je možné díky nízkým přenosovým ztrátám na vlnové délce 1550 nm. Kontrola teploty vinutí na elektrických transformátorech, měření vysokých proudů a zatížení vedení pro přenos elektrické energie jsou jen zlomkem použití FBG senzorů v tomto případě [3].

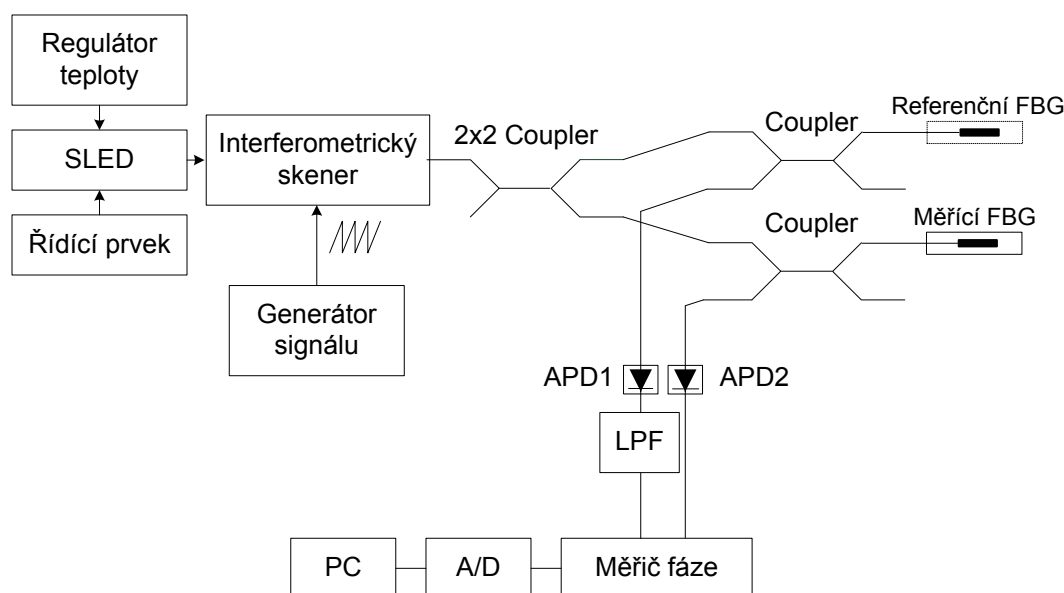
Znalost rozložení teplot v zařízeních pracujících na vysokém napětí a vysokých výkonech jako jsou generátory a transformátory je nezbytná k pochopení jejich provozu a k ověření nových nebo modifikovaných produktů. Vadná nebo degenerovaná zařízení mohou být detekována průběžným sledováním odchylky teploty ve vinutí. Jedním z konceptů je monitorování teploty výkonových transformátorů v síti z centrální polohy. Jsou k tomu použity FBG senzory pracující s TDM. Odražené signály nesou informace o teplotě pro každý z transformátorů. Rozmezí měřených teplot je od 30°C do 90°C s přesností 0,01°C a rozlišením 0,14 pm/°C [11].

## 4.3 Medicína

Většina komerčních senzorů široce používaných v lékařství je elektricky aktivní, proto není jejich použití vhodné v řadě lékařských aplikací, kde je použito mikrovlnného, radiofrekvenčního nebo ultrazvukového pole. Vláknové optické snímače tyto problémy nemají, jelikož jsou dielektrické. Obecně lze říct, že všechny tyto senzory jsou bodové a poskytují jen malé množství hodnot při použití v lidském těle. Použití pasivního multiplexování je sice možné avšak lze ho těžce dosáhnout z důvodů omezené velikosti sondy [3]. Velký potenciál začíná použití FBG nacházet i v oblasti biomechaniky a rehabilitačního inženýrství díky jejich výhodám jmenovaným výše. FBG jsou vhodné i pro *in vivo* aplikace, kde materiál snímače není pro tělo na obtíž i při dlouhodobém používání [13].



Měření výkonnosti srdce je klíčem k monitorování srdeční činnosti. Již od roku 1970 se používá studeného fyziologického roztoku pro měření krevního výkonu ze srdce. Katetr je vložen do pravé srdeční síně a umožňuje měření teploty krve v plicní tepně. Kombinací teplotního čtení a tepové frekvence, mohou lékaři určit, kolik krve srdce pumpuje. Tyto senzory jsou však aktivní a tedy nevhodné při použití v řadě lékařských aplikací, kde se používá silného magnetického pole. Katetr založený na FBG viz obrázek 4.2 je jednou z možností, jak se těchto nedostatků zbavit. Jako zdroj světla je použita superluminiscenční dioda. Odražené signály z referenční a měřicí FBG mřížky se zesílí pomocí lavinových fotodiod (APD) a signál z referenční FBG je naveden do filtru dolní propusti (LPF). Vysoké rozlišení detekce posunů vlnových délek vyvolaných změnou teploty je dosaženo použitím kompenzátoru posunu demultiplexováním jednoduchým monochromátorem, který nabízí WDM bez přeslechů. Tato sonda je nezávislá na strain detekci díky uložení sensorového FBG v ochranném pouzdru. Celý systém má rozlišení  $0,1^{\circ}\text{C}$  a přesnost  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  při práci v teplotním rozmezí  $30\text{--}60^{\circ}\text{C}$ , což dostačuje nebo převyšuje většinu lékařských aplikací [12].

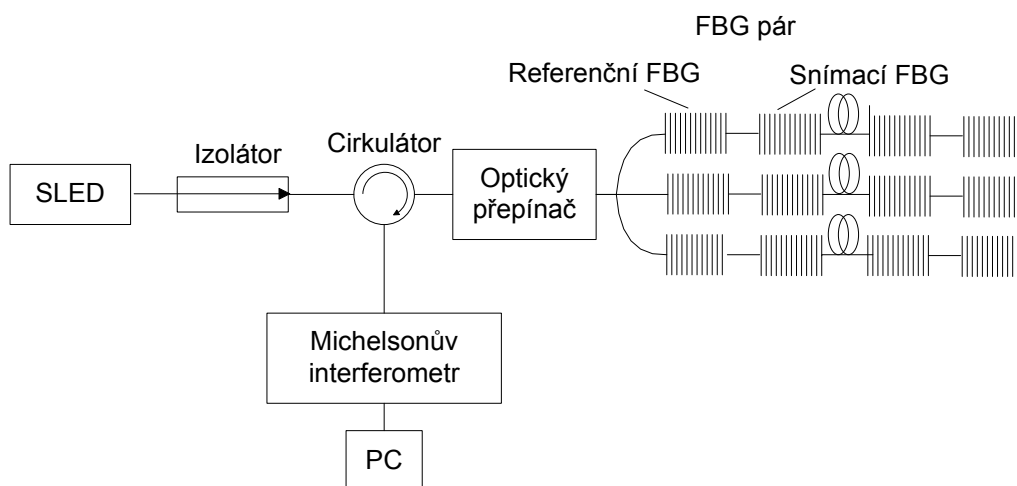


Obrázek 4.2: Schéma katétru s použitím Braggovských mřížek

#### 4.4 Chemické snímače

FOS snímače lze použít v oblasti životního prostředí a kontroly znečištění. Používají se ke snímání plynů jako je metan, amoniak, oxidu dusíku a také k monitorování mořské a pitné vody. Nevodivost a pasivní povaha FOS z nich činí ideální snímače do nebezpečného prostředí při bezpečném vzdáleném monitoringu. FBG snímače používané pro měření chemického snímání jsou založené na změně centrální vlnové délky se změnou indexu lomu skrz interakci mezi FBG a okolní chemickou látkou tedy přes změnu chemické koncentrace prostřednictvím změny evanescentního pole.

Častou příčinou důlních neštěstí a tedy i velkým problémem jsou vysoké koncentrace methanu a hlavně nevědomost o těchto vysokých číslech. Těmto problémům se lze vyhnout použitím systému, který by kontroloval hodnoty koncentrací v mnoha místech v reálném čase. FBG je možné využít jako distribuovaného systému na kontrolu nejen koncentrace methanu v atmosféře, ale také k měření teploty a mechanického napětí. Využívá se techniky FBG párů kdy jedno FBG slouží jako referenční a druhé plní roli snímacího, viz obrázek 4.3. Celkový počet senzorů jde zvětšit použitím optického přepínače. Tyto dva typy FBG tvoří jinou formu Fabry Perotova interferometru. Jako zdroj světla je použit SLED (Superluminiscentní LED) s velmi úzkou koherenční délkou. V experimentu bylo použito pět různých párů FBG párů lišící se intervaly (28 mm 29 mm 31 mm 33mm a 34 mm). Všechny tyto páry mají shodné vlastnosti a to centrální vlnovou délku kolem 1548 nm a šířku pásma 0,8 nm. Celý systém pro snímání koncentrace methanu pracuje na speciálním katalyzátoru, který je umístěn v otvoru a pracuje s napájecím zdrojem o 1,5 V, jehož teplota se zvyšuje s rostoucí koncentrací methanu. Vláknó FBG je umístěno v těsné blízkosti katalyzátoru, aby bylo citlivější na jeho změny teploty. Měření probíhalo na koncentracích methanu od 0 % do 6,4 % [14].



Obrázek 4.3: Schéma pro chemické snímače s použitím FBG páru

## 5 Návrh kvazi-distribuo­vaného systému v prostředí OptiSystem

Tato část práce se zabývá návrhem a simulací kvazi-distribuo­vaného systému senzoru mechanického napětí v prostředí OptiSystem.

### 5.1 OptiSystem

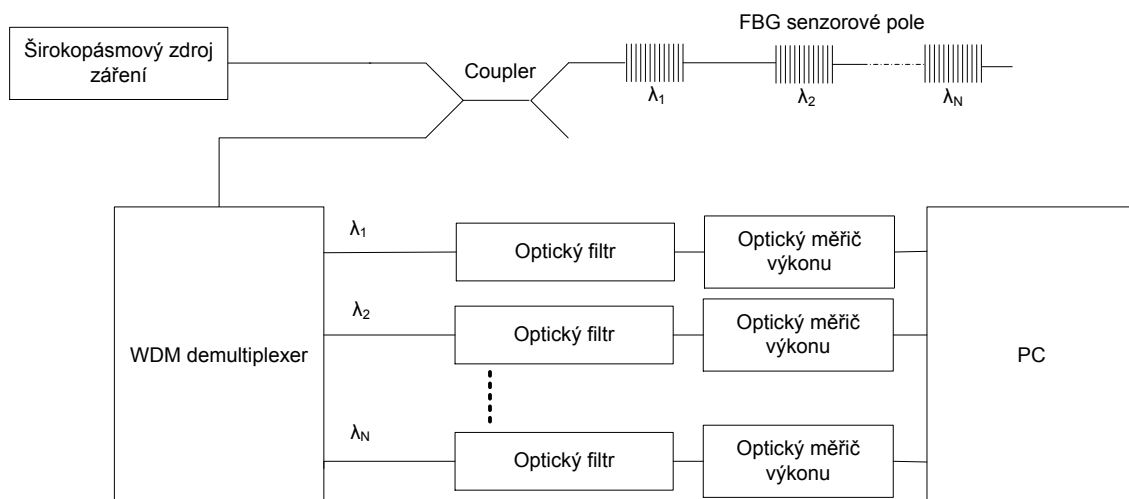
Je komplexní software, který umožňuje uživatelům plánovat, testovat a simulovat optická spojení v přenosové vrstvě moderních optických sítí. Jedná se o jeden z mnoha druhů produktů, který vyvinula firma Optiwave. Produkty této firmy lze rozdělit na aplikace pro návrh systémů, mezi něž patří zmiňovaný OptiSystem a také OptiSPICE. Druhým typem aplikací jsou software OptiGrating, OptiFiber, OptiFDTD a OptiBPM, které slouží pro návrh samotných prvků, jako jsou mřížky, vlákna a jiné. OptiSystem umožňuje uživatelům navrhovat a simulovat:

- optické sítě další generace,
- aktuální optické sítě,
- SONET - Synchronous Optical Network,
- SDH kruhové sítě,
- zesilovače,
- přijímače,
- vysílače.

Tento software nabízí přes 300 přizpůsobitelných komponentů, a také rozsáhlé nástroje pro post-processing a pokročilé funkce vizualizace. V současnosti je nejnovější verzí tohoto programu OptiSystem 13 [15].

### 5.2 Návrh samotného systému v programu OptiSystem

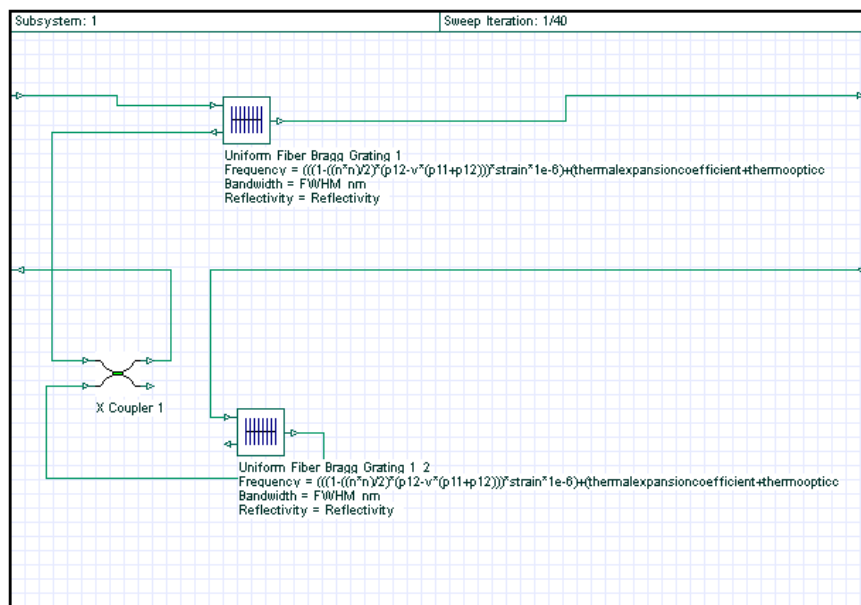
Jako zdroj světla je použit širokopásmový zdroj záření. Světlo z tohoto zdroje je navedeno do FBG senzorového pole, které je tvořeno jednotlivými FBG zapojenými do série. Každá z těchto Braggovských mřížek pracuje na jiné vlnové délce. Odražený signál ze všech mřížek je přes coupler napojen do WDM demultiplexeru, který vyděluje jednotlivé odražené signály do jednotlivých kanálů. Pro každý optický kanál je použit vlastní optický filtr. Poté je tenhle optický signál převeden na elektrický a vyhodnocuje se pomocí počítače, jak lze vidět na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Schématický návrh kvazi-distribovaného systému využívající WDM

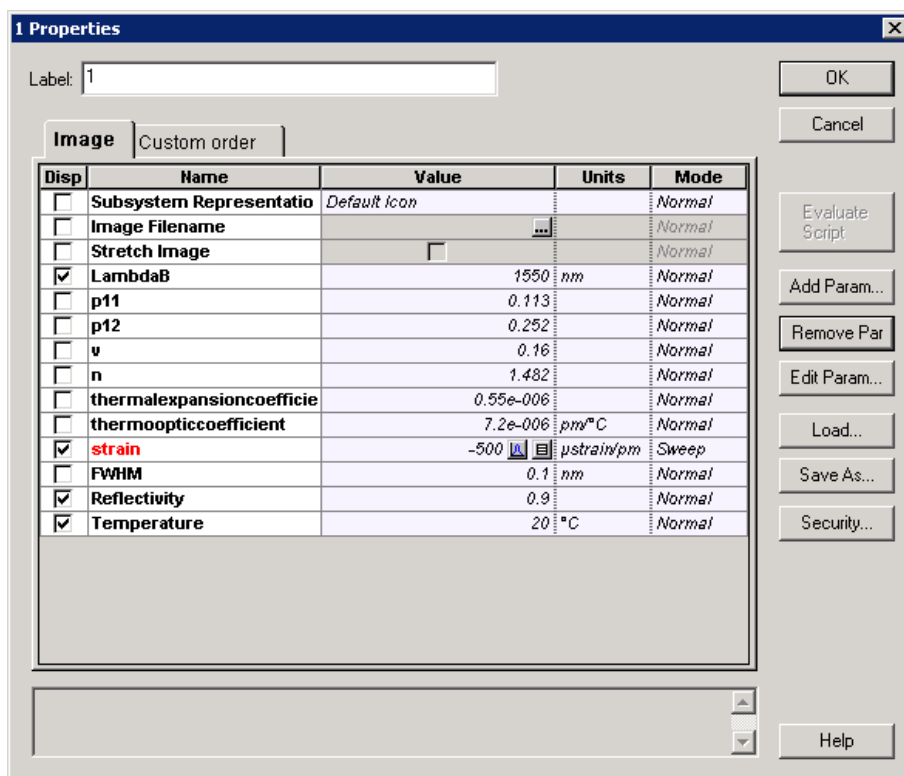
### 5.2.1 Návrh sensorové části

Základním prvkem celého návrhu je vytvoření subsystému. Použití subsystému umožňuje sériové spojování sensorových Braggovských mřížek. Spojování více FBG do sériového pole je díky tomuto subsystému jednodušší, protože absenci subsystému by se zvyšoval počet použitých FBG úměrný počtu senzorů. Další výhodou je snadnější změna a také nastavení dalších parametrů pro FBG uvnitř subsystému. Obě dvě Braggovské mřížky mají stejné parametry, jak lze vidět na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Návrh bloku subsystému

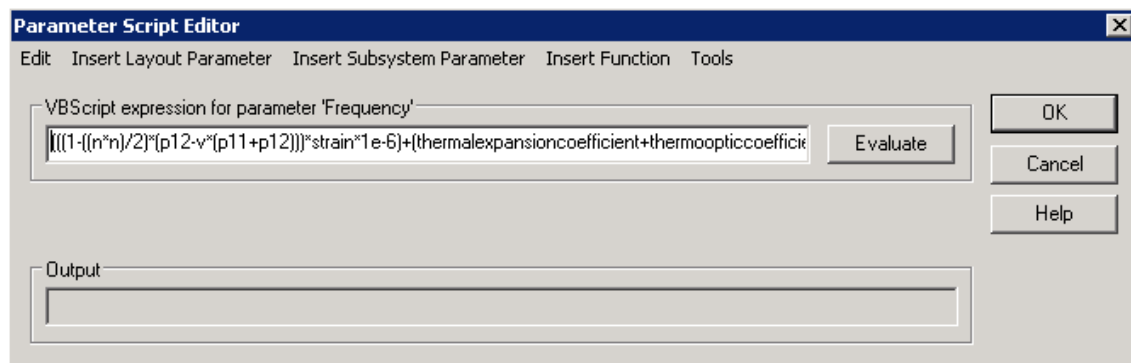
Každý subsystém má vlastní nastavení parametrů, které se promítá na obě dvě Braggovské mřížky umístěné uvnitř tohoto subsystému. Základními parametry FBG jsou *lambdaB*, *Reflectivity* a *FWHM*. *LambdaB* je Braggovská vlnová délka, *Reflectivity* je odrazivost a *FWHM* je šířka odraženého spektra Braggovské mřížky. Parametry *Temperature* a *Strain* slouží k nastavování teploty a deformace. Ostatní parametry slouží k nastavení koeficientů Braggovské mřížky, které popisují její teplotní a deformační vlastnosti. Tyto hodnoty byly zvoleny dle reálných FBG. Všechny tyto parametry lze vidět na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Parametry subsystému pro první FBG senzor

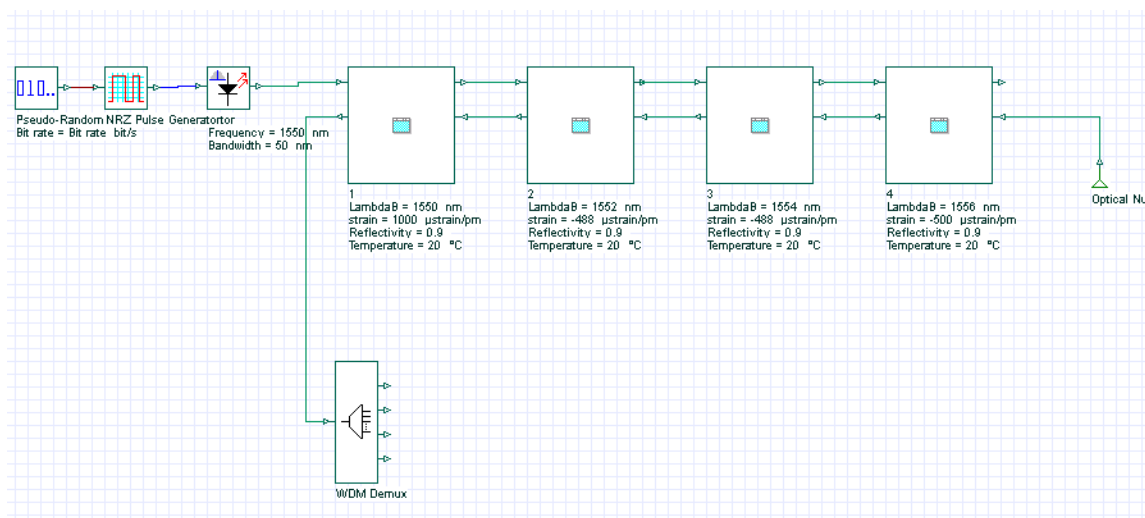
Na základě zadaných parametrů se vypočítává Braggovská vlnová délka. Tento vztah je pomocí skriptování zapsán do kolonky *Frequency* pro každou Braggovskou mřížku v jednotlivých subsystémech, jak lze vidět na obrázku 5.4. Vztah koresponduje se vzorcem 3.1 použitým v teoretické části práce. Celý vztah naskriptovaný uvnitř Braggovské mřížky je:

$$(((1 - ((n * n)/2) * (p12 - v * (p11 + p12)))) * strain * 1e6) + (thermalexpansioncoefficient + thermoopticcoefficient) * Temperature) * LambdaB + LambdaB \quad 5.1$$



Obrázek 5.4: Nastavení vlnové délky Braggovské mřížky

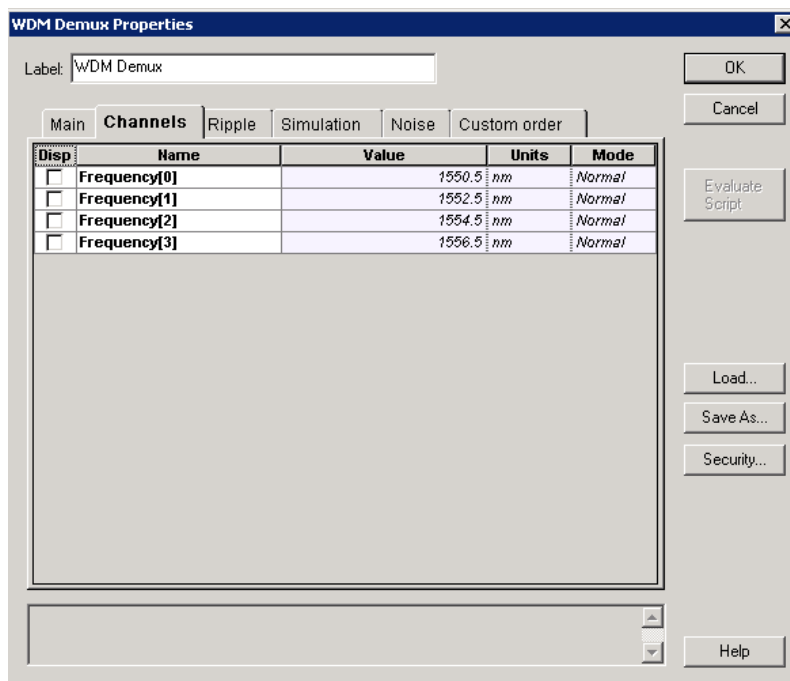
Základním prvkem sensorové části je zdroj světla. Jako zdroj záření byla použita LED dioda s šířkou pásma 50 nm. Tato LED musí být spojena s NRZ (Non Return to Zero) pulzním generátorem a tento generátor musí být napojen na pseudo náhodný sekvenční bitový generátor. Zdroj je naveden přímo do prvního bloku subsystému. Celé sériové sensorové pole je nutné v simulačním programu ukončit optickou nulou. Signál odražený z tohoto pole je naveden do WDM demultiplexeru. Správné nastavení demultiplexeru je nutné pro bezproblémové vydělování jednotlivých signálů ze všech subsystému. V případě simulace viz obrázek 5.5, jsou použity 4 subsystémy, každý reprezentující jeden senzor.



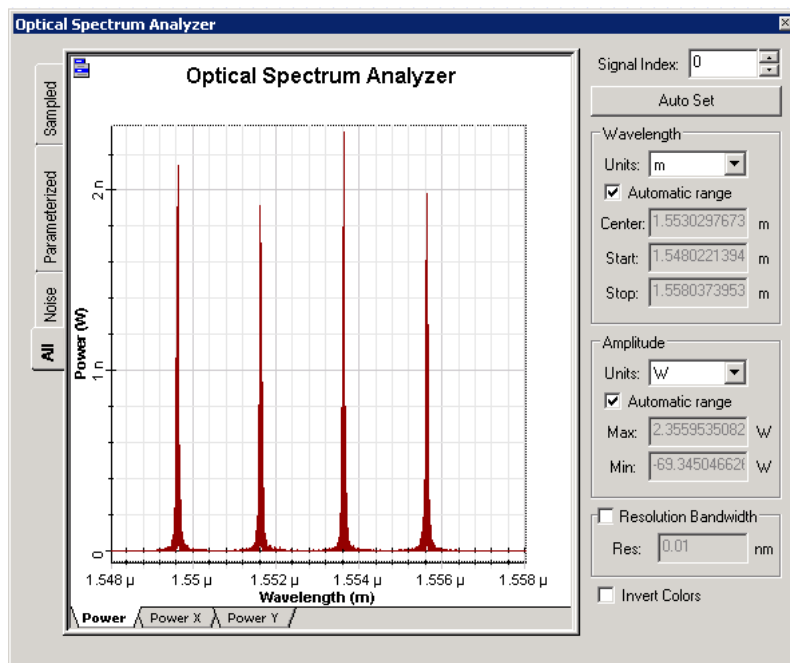
Obrázek 5.5: Sensorová část kvazi-distribuovaného systému

Pomocí WDM demultiplexeru je nutné tyto signály vydělit do jednotlivých kanálů. Pro každý signál je nutné nastavit samostatný kanál. Nastavení těchto kanálů lze vidět na obrázku 5.6. Pro zvolené simulační hodnoty strain od -500 do 1000  $\mu\epsilon$  je nutné pro první kanál vyhradit šířku pásma od 1549,525 do 1551,475 nm, další kanály jsou oproti tomuto posunuty o 2 nm. Šířka pásma jednoho kanálu je tedy i s přidáním určité rezervy 1,95 nm. Tato hodnota se nastavuje v záložce Main u WDM demultiplexeru. Tyto kanály jsou dále napojeny

do vyhodnocovací části systému s optickými filtry. Na obrázku 5.7 jsou zobrazeny odražené signály ze sensorového pole Braggových mřížek před jejich rozdělením na jednotlivé kanály a to pro 4 různé vlnové délky každá reprezentující jeden senzor a obrázek.



Obrázek 5.6: Nastavení kanálů u WDM demultiplexeru



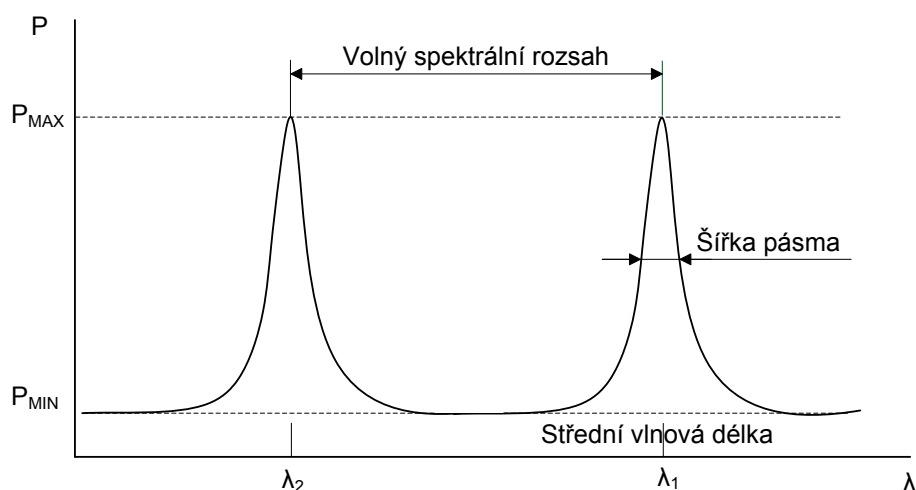
Obrázek 5.7: Odražené signály ze sensorového pole

## 5.2.2 Návrh vyhodnocovací části

Signály v jednotlivých kanálech jsou navedeny do optického filtru. Jako optický filtr byl použit nejprve Fabry Perotův filtr neboli etalon a posléze Braggovská mřížka. Za optickým filtrem je připojen optický měřič výkonu. Zde se optický signál převádí do elektrické podoby pro jeho snazší vyhodnocení.

### 5.2.2.1 Použití Fabry Perotova optického filtru

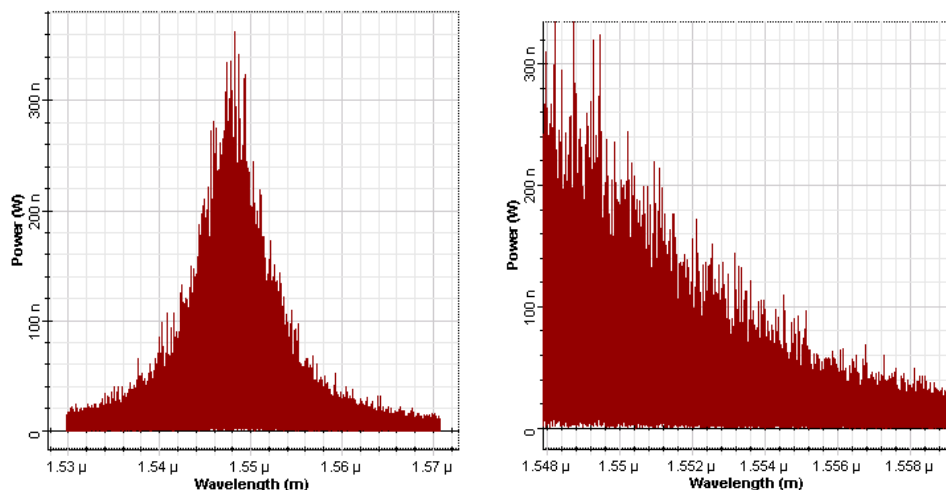
V programu Optisystem byly jako základní parametry pro správnou vyhodnocovací funkci Fabry Perotova filtru zvoleny vícery parametry. *Frequency*, tedy střední vlnová délka nejbližšího vrcholu Fabry Perotova filtru, byla nastavena na 1548 nm. *Bandwidth*, tedy šířka pásma jednoho vrcholu, byla nastavena na 8 nm. *Free spectral range (FSR)*, tedy volný spektrální rozsah značící separaci vlnových délek mezi sousedními vrcholy byl nastaven na 80 nm. Tyto hodnoty jsou nastaveny dle katalogových hodnot reálného optického Fabry Perotova filtru. Znázornění jednotlivých parametrů lze vidět na obrázku 5.8.



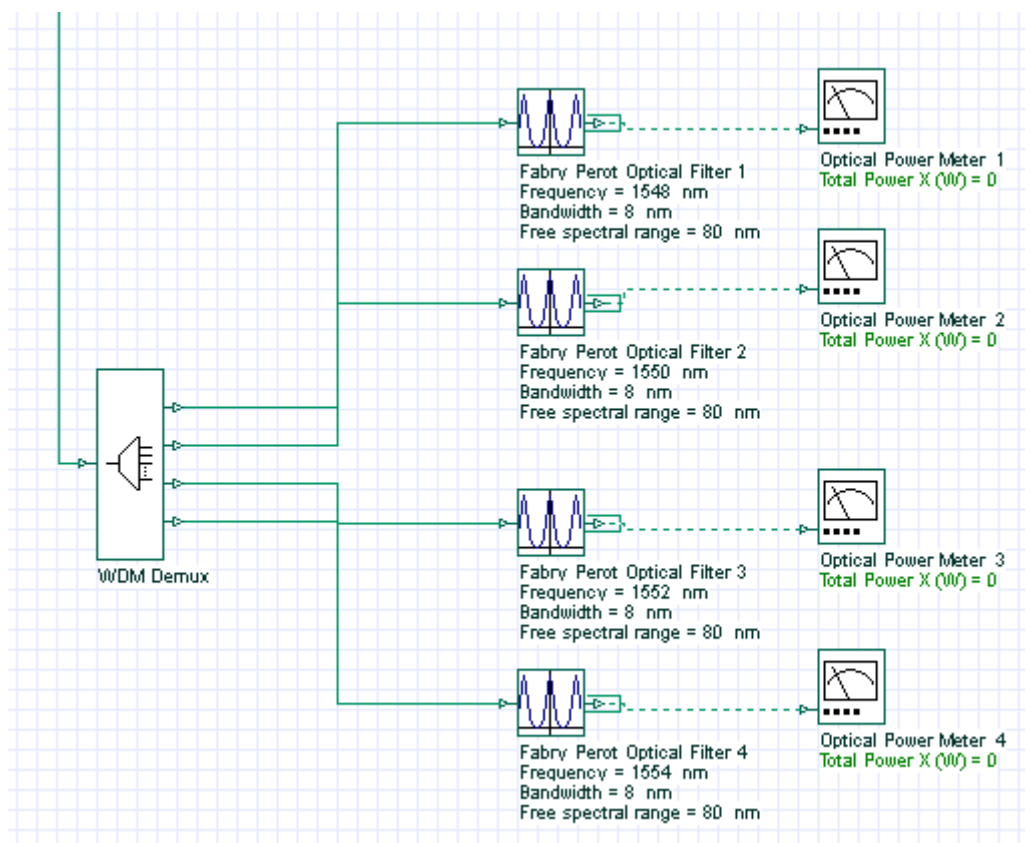
Obrázek 5.8: Parametry Fabry Perotova optického filtru

Následující obrázek 5.10 zobrazuje vyhodnocovací část při použití Fabry Perotova optického filtru s výše uvedenými parametry. Každý signál vydělený do samostatného kanálu je naveden do Fabry Perotova filtru, kde je pomocí vhodně zvolených parametrů filtrován. Jedná se o průnik odraženého a vyděleného signálu ze sensorové části a samotného filtru. Jako část optického spektra tohoto filtru se používá sestupná hrana, viz obrázek 5.9. Hodnoty výkonu jsou následně převedeny na elektrický výkon pomocí optického měřiče a vyhodnoceny.





Obrázek 5.9: Celá a použitá část spektra Fabry Perotova filtru sloužící k vyhodnocování

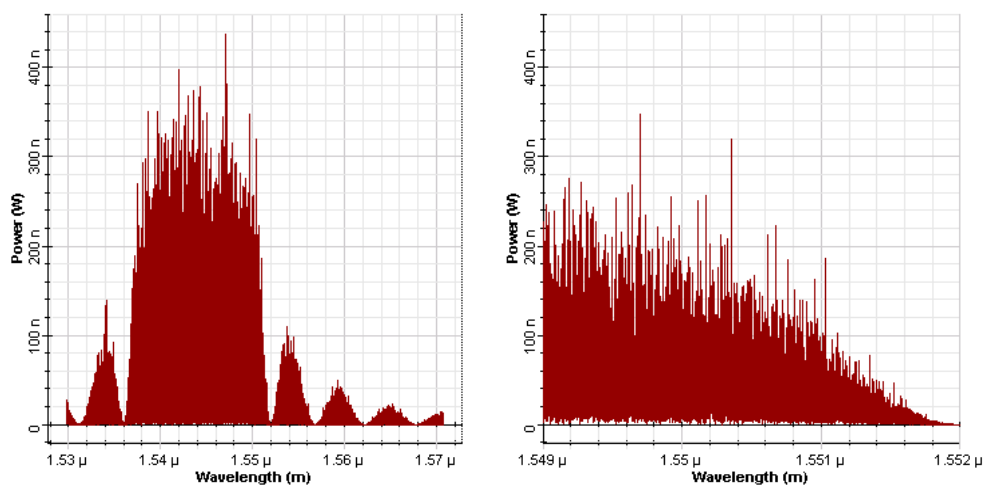


Obrázek 5.10: Vyhodnocovací část s použitím Fabry Perotova optického filtru

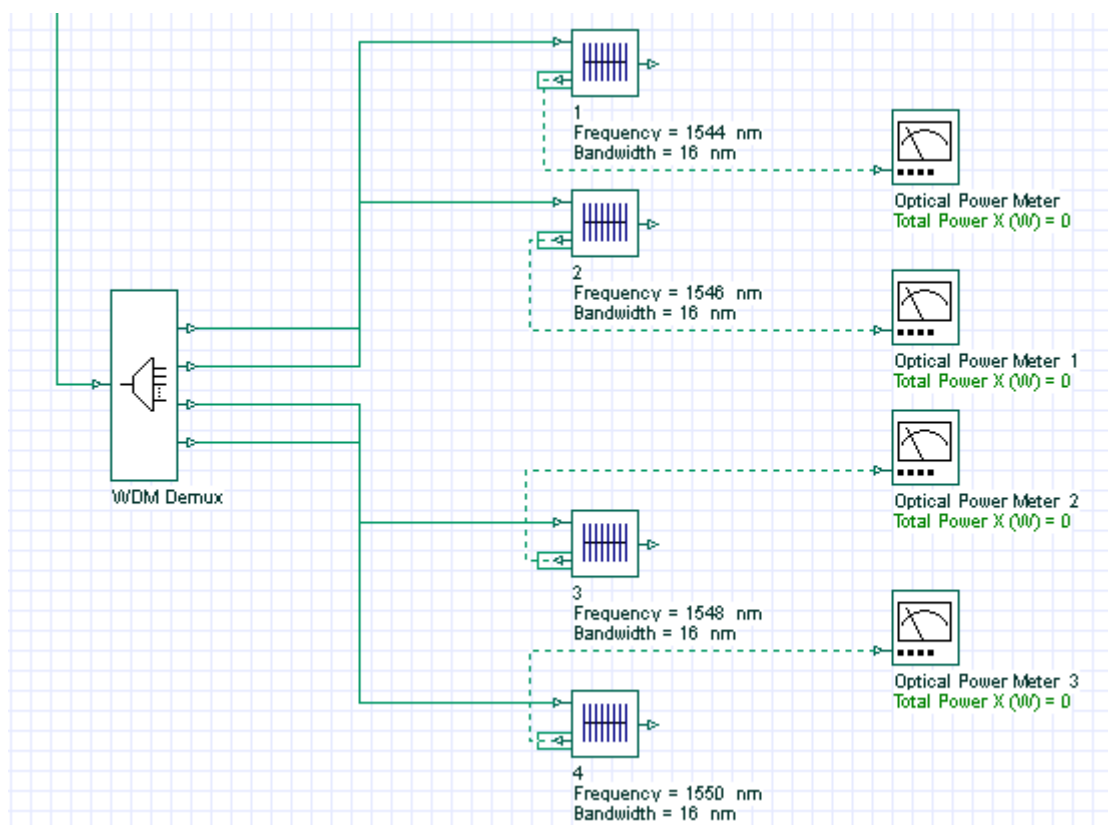
#### 5.2.2.2 Použití Braggovské mřížky jako optického filtru

Použití Braggovské mřížky jako vyhodnocovacího filtru bylo použito z hlediska srovnání více vyhodnocovacích metod. Obrázek 5.11 ukazuje spektrum z vyhodnocovací Braggovské mřížky kde se používá průniku tohoto spektra a signálu ze sensorového pole. Na místo Fabry Perotova

optického filtru bylo tedy použito Braggovské mřížky, avšak způsob vyhodnocování zůstává stejný. Na obrázku 5.12 je zapojení WDM demultiplexeru a Braggovských mřížek pro každý kanál.



Obrázek 5.11: Celé spektrum a použitá část spektra FBG sloužící k vyhodnocování



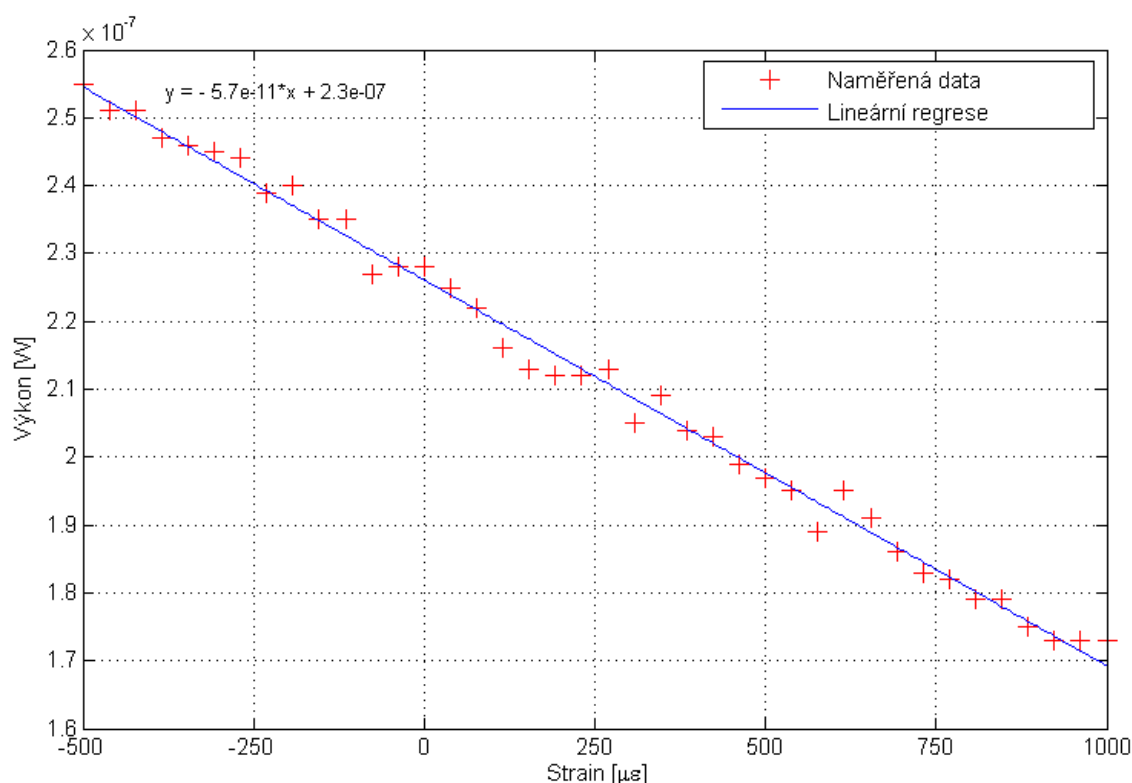
Obrázek 5.12: Vyhodnocovací část s použitím Braggovské mřížky

### 5.3 Simulace kvazi-distribuo­vaného senzoru mechanického napětí

Hlavním úkolem simulace celého systému je vyhodnocování mechanického napětí. Hodnoty mechanického napětí byly nastavovány v rozmezí od -500 do 1000  $\mu\epsilon$  s krokem 38,4615  $\mu\epsilon$ . Bylo nasimulováno 40 iterací v rozmezí těchto hodnot. Těchto měření bylo provedeno 10 z hlediska správného statistického šetření pro oba způsoby vyhodnocování. Výstupem celého systému je úroveň výkonu, sledována na optickém měřiči výkonu. Tento výkon je dán do vztahu s hodnotou strain, která se nastavuje v subsystému. Z těchto hodnot je následně provedena regresní analýza.

#### 5.3.1 Fabry Perotův filtr

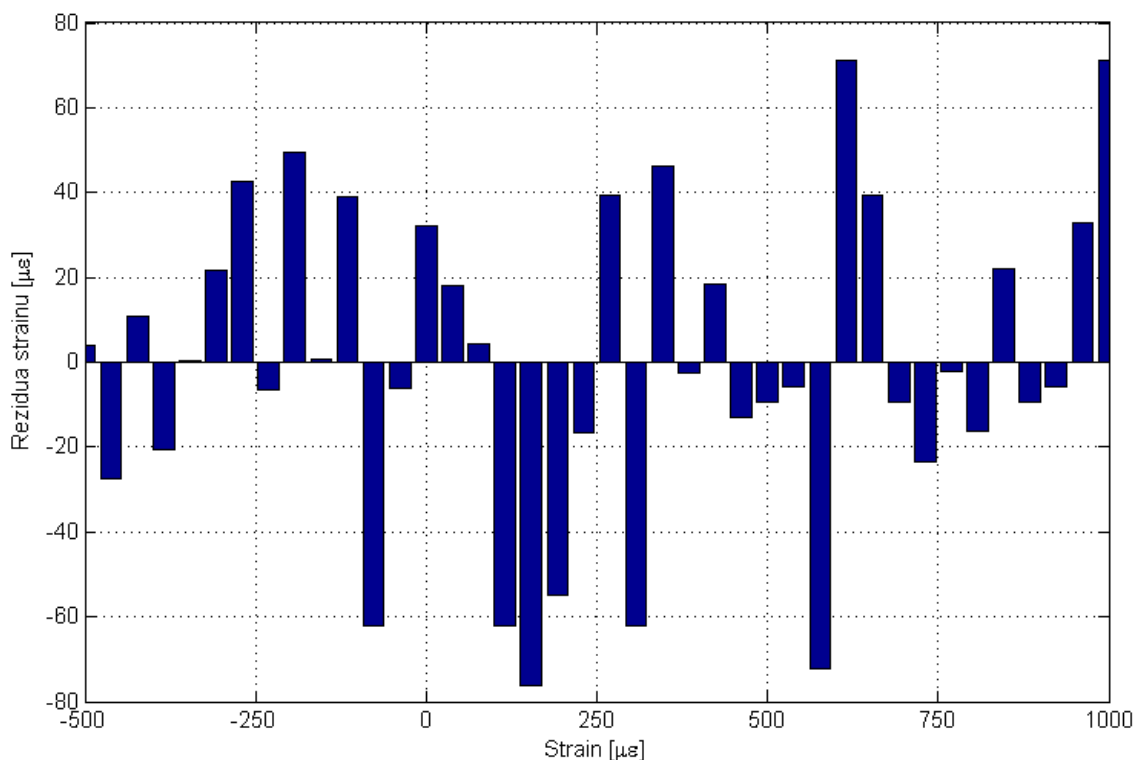
Naměřené hodnoty pro různé hodnoty strain od -500 do 1000  $\mu\epsilon$  byly vyčteny na optickém měřiči výkonu. Tato data byla následně zpracována v programu MATLAB a Statgraphics. Bylo použito regresní analýzy. Jedná se o jednu ze statistických metod, pomocí níž se odhaduje hodnota jisté náhodné veličiny na základě znalosti jiných veličin, v tomto případě hodnoty strain a úrovně výkonu. Byl použit lineární model regresní analýzy, který se nejvíce podobal proložení naměřených dat, viz obrázek 5.13. Hodnota R-squared, tedy koeficient determinace, nabyl hodnoty 99,32%. Z této hodnoty můžeme vyvodit, že 99,32% naměřených hodnot lze pomocí lineárního modelu vysvětlit.



Obrázek 5.13: Naměřené hodnoty a použití lineární regrese při vyhodnocování pomocí Fabry Perotova optického filtru

Ze zpracování naměřených dat vyšly následující výsledky. Citlivost  $C$  říká, jak se změní výkon při změně deformace o  $1 \mu\epsilon$ . Celková citlivost systému byla vypočtena na  $0,0547 \text{ nW}/\mu\epsilon$  dle vzorce 5.2, kde  $\Delta P$  je rozsah výkonu a  $\Delta \epsilon$  značí rozsah deformace. Rozsah celého systému byl od  $-500$  do  $1000 \mu\epsilon$ . Přesnost systému byla dle maximální hodnoty reziduí  $76,06 \mu\epsilon$ , jak lze vidět na obrázku 5.14.

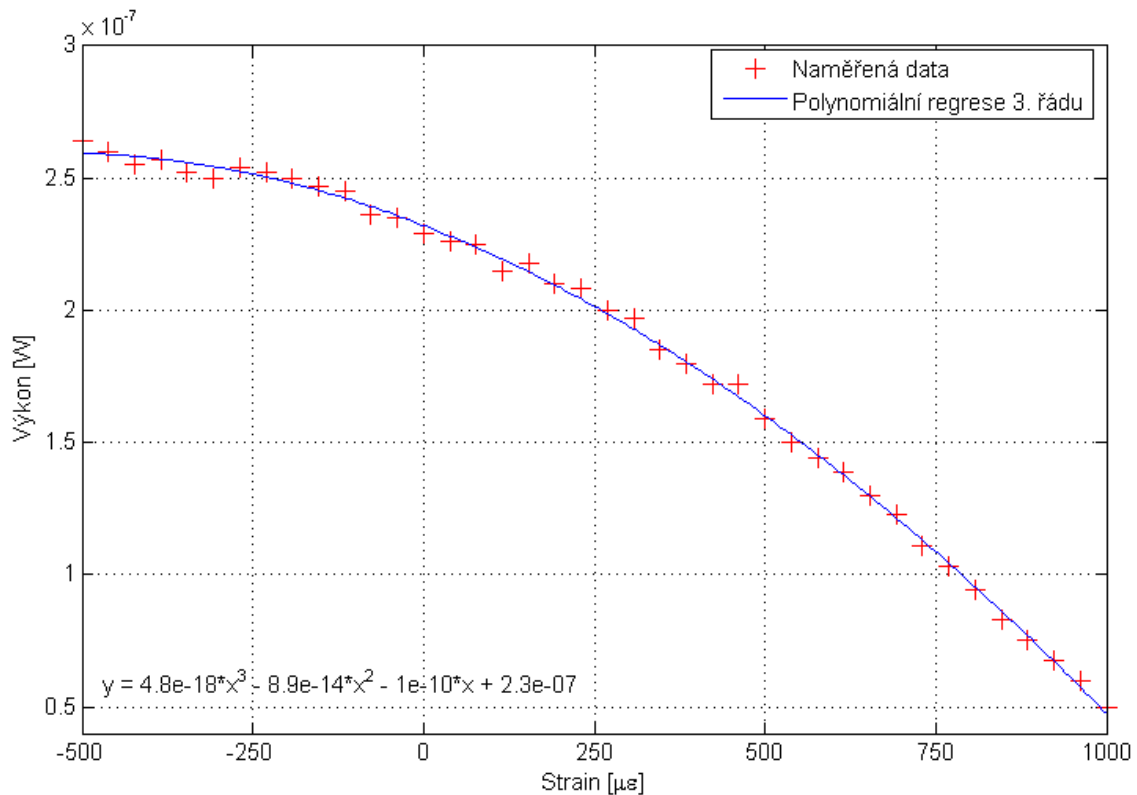
$$C = \frac{\Delta P}{\Delta \epsilon} = \frac{0,821 \times 10^{-7}}{1500} = 0,0547 \text{ nW}/\mu\epsilon \quad 5.2$$



Obrázek 5.14: Rezidua pro různé hodnoty strain pro vyhodnocování pomocí Fabry Perotova optického filtru

### 5.3.2 FBG

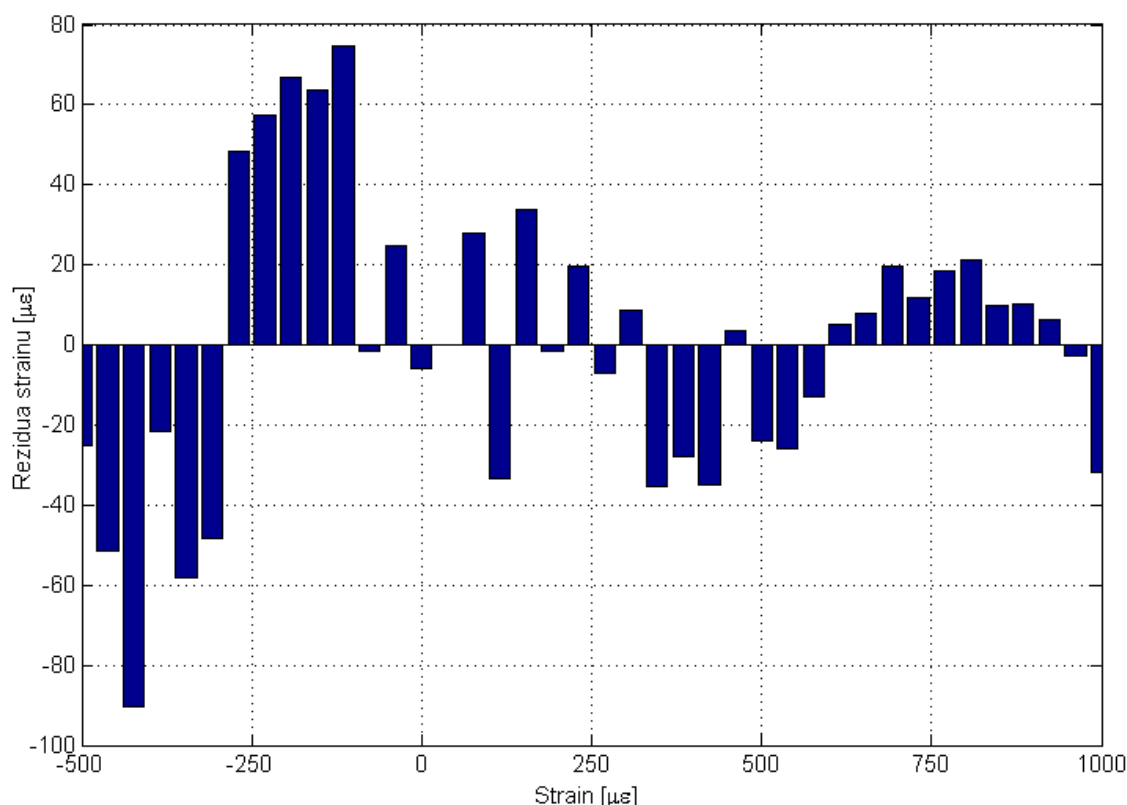
Naměřená výkonová úroveň pro různé hodnoty strain od  $-500$  do  $1000 \mu\epsilon$  byla zaznamenána pomocí optického měřiče výkonu. Pro vyhodnocování pomocí FBG a následné vypracování těchto dat bylo použito regresní analýzy, jak tomu bylo také u vyhodnocování pomocí Fabry Perotova optického filtru. Model, který nejvíce odpovídal hodnotě jisté náhodné veličiny, byl model polynomiální regrese 3. řádu. Hodnota koeficientu determinace byla u tohoto modelu 100%.



Obrázek 5.15: *Naměřené hodnoty a použití polynomiální regrese 3. Řádu pro FBG vyhodnocování*

Citlivost celého systému  $C$  byla vypočtena na  $0,143 \text{ nW}/\mu\epsilon$  dle vzorce 5.3. Rozsah byl pro hodnoty od  $-500$  do  $1000 \mu\epsilon$ . Přesnost systému byla dle maximální hodnoty reziduí  $90,57 \mu\epsilon$ , jak lze vidět na obrázku 5.16. Při použití toho návrhu pro rozsah hodnot od  $-400$  do  $1000 \mu\epsilon$  by byla přesnost  $74,81 \mu\epsilon$ .

$$C = \frac{\Delta P}{\Delta \epsilon} = \frac{2,14 \times 10^{-7}}{1500} = 0,143 \text{ nW}/\mu\epsilon \quad 5.3$$



Obrázek 5.16: Rezidua pro různé hodnoty strain pro FBG vyhodnocování

#### 5.3.2.1 Porovnání navržených systémů

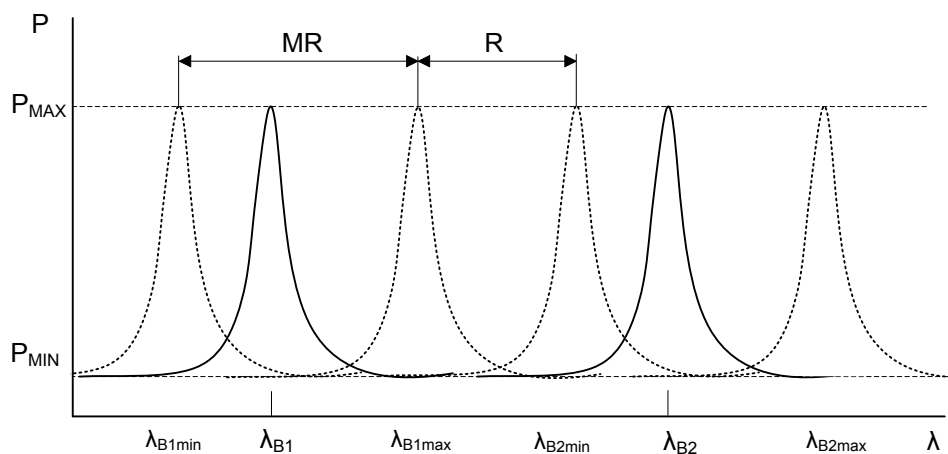
Výkony, které jsme změřili pro každý ze systémů pro hodnoty strain od -500 do 1000  $\mu\epsilon$  byly zpracovány pomocí programu MATLAB a Statgraphics. Byla provedena regresní analýza pro každý ze systémů. Pro vyhodnocování pomocí Fabry Perotova filtru byla zvolena lineární regrese s největším koeficientem determinace. Hodnota tohoto koeficientu byla 99,32% z čehož jde vyvodit, že 99,32% naměřených hodnot lze pomocí zvoleného modelu vysvětlit. Při použití Braggovské mřížky byla použita polynomiální regrese 3. řádu a koeficient determinace byl 100%. Citlivost systému založeného na vyhodnocování pomocí Fabry Perotova optického filtru je 0,0547 nW/ $\mu\epsilon$ , což je oproti citlivosti 0,143 nW/ $\mu\epsilon$  při použití Braggovské mřížky hodnota téměř třetinová. Přesnost systému při použití Fabry Perotova filtru je 76,06  $\mu\epsilon$  a pro Braggovskou mřížku je to 90,57  $\mu\epsilon$ . Vyhodnocování pomocí Fabry Perotova optického filtru je tedy co se týče do přesnosti o 16,021% přesnější než při použití Braggovské mřížky.

#### 5.3.3 Parametry limitující maximální počet senzorů

Jedním z důležitých parametrů je počet senzorů, které lze vyhodnocovat. V systému jsou pevně nastavené hodnoty jako je spektrální šířka LED diody  $\Delta\lambda_{LED} = 50$  nm a střední Braggovská vlnová délka  $\Delta\lambda_{B1} = 0,1$  nm. Parametr  $MR$ , tedy měřicí rozsah, je od -500 do 1000  $\mu\epsilon$  pro rozsah vlnových délek od 1549,63 až 1551,461 nm.  $R$ , tedy rezerva, mezi vlnovými délkami dvou sousedních senzorů je minimálně 0,119 nm. Při použití těchto hodnot je

možné sériově spojit a vyhodnocovat 25 senzorových subsystémů. Pro zvětšení počtu senzorů  $N$ , je nutné změnit některé z parametru, viz vzorec 5.4, kde parametr  $k$  slouží k přepočtu měřícího rozsahu v  $\mu\text{e}$  na rozsah vlnových délek  $\Delta\lambda_b$ . Na obrázku 5.17 lze vidět znázornění parametrů pro dvě sousední vlnové délky.

$$N = \frac{\Delta_{LED}}{\Delta_{FBG} + R} = \frac{\Delta_{LED}}{MR * k + R} \quad 5.4$$



Obrázek 5.17: *Znázornění parametrů limitující maximální počet senzorů pro dva sousední senzory*

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a simulovat kvazi-distribuovaný senzor mechanického napětí založeného na Braggovských mřížkách využívající vlnový multiplex v prostředí OptiSystem. Celý návrh a simulace systému byla rozdělena na dvě části. První částí je návrh senzoru. Druhá část slouží k vyhodnocování a obsahuje dva různé návrhy. Prvním je použití Fabry Perotova optického filtru a druhým je použití Braggovské mřížky.

První část práce byla zaměřena na teoretický rozbor. V této teoretické části byly popsány jednotlivé prvky, které byly použity pro návrh a simulaci v druhé části práce. Nejdůležitějším prvkem byla Braggovská mřížka a proto jí byla věnována převážná část teoretické práce. U tohoto optického filtru byla popsána podstata jeho činnosti. Byla zmíněna teorie výroby Braggovských mřížek a s tím související fotocitlivosti optických vláken do kterých se tato mřížka zapisuje. Dále byly popsány metody pro zvýšení fotocitlivosti a s tím související fotocitlivé typy Braggovských mřížek. Dalším rozdělení FBG bylo typově dle struktury změny indexu lomu a periody těchto změn v jádře vlákna. Důležitou částí byl způsob použití FBG jako senzoru a popis jednotlivých metod. Jelikož v práci byl použit vlnový multiplex, byla sepsána kapitola popisující různé druhy multiplexování a také různé možnosti použití FBG v mnoha dnešních odvětvích.

V druhé části byl popsán samotný návrh senzoru FBG využívajícího vlnový multiplex. K návrhu bylo použito simulačního prostředí programu OptiSystem. Důležitým prvkem byl návrh subsystému sloužícího pro zlepšení zadávání a přidání parametrů a také pro zmenšení počtu FBG. Následně bylo využito Fabry Perotova optického filtru a také Braggovské mřížky k účelu vyhodnocení hodnot ze sensorové části systému, kdy bylo použito průniku signálu ze sensorové části a výše zmíněných optických filtrů. Parametry obou optických filtrů byly zvoleny pro co nejlepší výsledky citlivosti a přesnosti. Za každým optickým filtrem byl umístěn optický měřič výkonu, kde byla optická veličina změněna na elektrickou pro její snazší vyhodnocení. Z těchto hodnot byla následně provedena regresní analýza a hodnoty byly staticky zpracovány. Citlivost systému založeného na vyhodnocování pomocí Fabry Perotova optického filtru je třetinová při hodnotě  $0,0547 \text{ nW}/\mu\text{e}$  oproti použití Braggovské mřížky, která dosahuje citlivosti  $0,143 \text{ nW}/\mu\text{e}$ . Přesnost vyhodnocovacího systému založeného na Fabry Perotově filtru je  $76,06 \mu\text{e}$ , což je o  $16,021\%$  lepší hodnota než je tomu při použití Braggovské mřížky.

Práce ukázala možnosti simulačního programu Optisystem, který vzhledem ke své komplexnosti nepracoval vždy ideálně. Problém představovalo použití WDM demultiplexeru použitého k vydělování jednotlivých signálů ze sensorové části do samostatných kanálů. Tato komponenta občas způsobovala nemožnost posunutí vlnové délky optického filtru a tím docházelo k nesprávnému vyhodnocování.



## Použitá literatura

- [1] OTHONOS A., KALLI K., Fiber Bragg gratings - Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing, Artech House, INC., Norwood, 1999
- [2] FANG, Zujie. Fundamentals of optical fiber sensors. Hoboken, N.J.: Wiley, c2012, xiii, 476 p. ISBN 9780470575406.
- [3] YIN, Shizhuo, Paul B RUFFIN a Francis T YU. Fiber optic sensors. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2008, xiii, 477 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 1420053655.
- [4] KONSTANTAKI, M., G. TAMIOLAKIS, A. ARGYRIS, A. OTHONOS a A. IKIADES. Effects of Ge concentration, boron co-doping, and hydrogenation on fiber Bragg grating characteristics. Microwave and Optical Technology Letters[online]. 2004, vol. 44, issue 2, s. 148-152 [cit. 2015-02-19]. DOI: 10.1002/mop.20572.
- [5] IANG, Hao, Jing CHEN, Tundong LIU a Wencai HUANG. A novel wavelength detection technique of overlapping spectra in the serial WDM FBG sensor network. Sensors and Actuators A: Physical [online]. 2013, vol. 198, s. 31-34 [cit. 2015-02-19]. DOI: 10.1016/j.sna.2013.04.023.
- [6] LEMAIRE, P.J., R.M. ATKINS, V. MIZRAHI a W.A. REED. High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibres. Electronics Letters [online]. 1993, vol. 29, issue 13 [cit. 2015-02-23]. DOI: 10.1049/el:19930796.
- [7] UDD, Eric. An overview of fiber-optic sensors. 1995, vol 66, s. 17. [cit. 2015-02-23]. DOI: 0034-6748.
- [8] RAO, Y. J., A. B. Lobo RIBEIRO, D. A. JACKSON, L. ZHANG a I. BENNION. Combined spatial- and time-division-multiplexing scheme for fiber grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection. Optics Letters[online]. 1995, vol. 20, issue 20 [cit. 2015-03-05]. DOI: 10.1364/ol.20.002149.
- [9] DAVIS, M. A., et al. A 60 element fiber Bragg grating sensor sytem. Proceeding of the Optical fiber Sensor Conference (OFS-11), Sapporo, Japan, 199, pp. 100-103.
- [10] YE, X. W., Y. Q. NI a J. H. YIN. Safety Monitoring of Railway Tunnel Construction Using FBG Sensing Technology. Advances in Structural Engineering [online]. 2013, vol. 16, issue 8, s. 1401-1410 [cit. 2015-03-10]. DOI: 10.1260/1369-4332.16.8.1401.
- [11] RAWAT, Banmali S., Sanathanan V. THANGARAJ a Jaromir PISTORA. Optical communication networks for industrial applications: process control and related applications. In: 2013 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING AND COMMUNICATION (ICSC) [online]. 2013, s. 302-374 [cit. 2015-03-11]. DOI: 10.1007/978-3-540-68468-8\_6.

- [12] RAO, Y. J. Optical In-Fiber Bragg Grating Sensor Systems for Medical Applications. *Journal of Biomedical Optics* [online]. 1998, vol. 3, issue 1 [cit. 2015-03-17]. DOI: 10.1117/1.429860.
- [13] AL-FAKIH, Ebrahim, Noor Azuan Abu OSMAN, Faisal Rafiq Mahamd ADIKAN, R. SURESH, S. C. TJIN a J. HAO. The Use of Fiber Bragg Grating Sensors in Biomechanics and Rehabilitation Applications: The State-of-the-Art and Ongoing Research Topics. *Sensors* [online]. 2012, vol. 12, issue 12, s. 441-480 [cit. 2015-03-17]. DOI: 10.1007/978-3-642-24463-6\_12.
- [14] Tianhao Xia, Bin Zhou, Weisheng Liu, Zuguang Guan. A Coal Mine Security Monitoring System Based on Multiplexed Fibre Bragg Grating Sensors and Coherence-Multiplexing Technique [online]. 2008. [cit. 2015-03-29]. ISBN 978-1-55752-863-6. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?uri=AOE-2008-SaK44>
- [15] OptiSystem Overview. *Optiwave*. [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-communication-system-design/>

## Seznam příloh

|            |  |   |
|------------|--|---|
| Příloha A: | Naměřené hodnoty z provedených simulací..... | i |
|------------|--|---|

---

Příloha A: *Naměřené hodnoty z provedených simulací*

Tabulka A.1: *Tabulka naměřených hodnot při použití Fabry Perotova optického filtru*

| Bandwidth = 8 nm FSR = 80 nm |                   |                      |
|------------------------------|-------------------|----------------------|
| Strain [με]                  | Průměr výkonu [W] | Rezidua strainu [με] |
| -500                         | 2,55E-07          | 3,9442               |
| -461,5384615                 | 2,51E-07          | -27,4848             |
| -423,0769231                 | 2,51E-07          | 10,9767              |
| -384,6153846                 | 2,47E-07          | -20,4523             |
| -346,1538462                 | 2,46E-07          | 0,536639             |
| -307,6923077                 | 2,45E-07          | 21,5255              |
| -269,2307692                 | 2,44E-07          | 42,5144              |
| -230,7692308                 | 2,39E-07          | -6,38719             |
| -192,3076923                 | 2,40E-07          | 49,547               |
| -153,8461538                 | 2,35E-07          | 0,645346             |
| -115,3846154                 | 2,35E-07          | 39,1069              |
| -76,92307692                 | 2,27E-07          | -62,2127             |
| -38,46153846                 | 2,28E-07          | -6,27848             |
| 0                            | 2,28E-07          | 32,1831              |
| 38,46153846                  | 2,25E-07          | 18,2267              |
| 76,92307692                  | 2,22E-07          | 4,27032              |
| 115,3846154                  | 2,16E-07          | -62,1039             |
| 153,8461538                  | 2,13E-07          | -76,0603             |
| 192,3076923                  | 2,12E-07          | -55,0714             |
| 230,7692308                  | 2,12E-07          | -16,6099             |
| 269,2307692                  | 2,13E-07          | 39,3243              |
| 307,6923077                  | 2,05E-07          | -61,9952             |
| 346,1538462                  | 2,09E-07          | 46,3568              |
| 384,6153846                  | 2,04E-07          | -2,5448              |
| 423,0769231                  | 2,03E-07          | 18,4441              |
| 461,5384615                  | 1,99E-07          | -12,9849             |
| 500                          | 1,97E-07          | -9,46863             |
| 538,4615385                  | 1,95E-07          | -5,95236             |
| 576,9230769                  | 1,89E-07          | -72,3266             |
| 615,3846154                  | 1,95E-07          | 70,9707              |
| 653,8461538                  | 1,91E-07          | 39,5417              |
| 692,3076923                  | 1,86E-07          | -9,35992             |
| 730,7692308                  | 1,83E-07          | -23,3163             |
| 769,2307692                  | 1,82E-07          | -2,32739             |
| 807,6923077                  | 1,79E-07          | -16,2838             |
| 846,1538462                  | 1,79E-07          | 22,1778              |
| 884,6153846                  | 1,75E-07          | -9,25122             |
| 923,0769231                  | 1,73E-07          | -5,73495             |
| 961,5384615                  | 1,73E-07          | 32,7266              |
| 1000                         | 1,73E-07          | 71,1881              |

Tabulka A.2: *Tabulka naměřených hodnot při použití Braggovské mřížky jako optického filtru*

| Bandwidth = 16 nm |                   |                      |
|-------------------|-------------------|----------------------|
| Strain [μɛ]       | Průměr výkonu [W] | Rezidua strainu [μɛ] |
| -500              | 2,64E-07          | -25,0796             |
| -461,5384615      | 2,60E-07          | -51,6492             |
| -423,0769231      | 2,55E-07          | -90,5663             |
| -384,6153846      | 2,57E-07          | -21,6659             |
| -346,1538462      | 2,52E-07          | -58,0452             |
| -307,6923077      | 2,50E-07          | -48,3621             |
| -269,2307692      | 2,54E-07          | 48,3129              |
| -230,7692308      | 2,52E-07          | 57,3394              |
| -192,3076923      | 2,50E-07          | 67,0225              |
| -153,8461538      | 2,47E-07          | 63,5256              |
| -115,3846154      | 2,45E-07          | 74,8063              |
| -76,92307692      | 2,36E-07          | -1,50035             |
| -38,46153846      | 2,35E-07          | 24,9462              |
| 0                 | 2,29E-07          | -5,72742             |
| 38,46153846       | 2,26E-07          | 0,00951413           |
| 76,92307692       | 2,25E-07          | 27,8275              |
| 115,3846154       | 2,15E-07          | -33,1908             |
| 153,8461538       | 2,18E-07          | 33,822               |
| 192,3076923       | 2,10E-07          | -1,51658             |
| 230,7692308       | 2,08E-07          | 19,6339              |
| 269,2307692       | 2,00E-07          | -6,8942              |
| 307,6923077       | 1,97E-07          | 8,86132              |
| 346,1538462       | 1,85E-07          | -35,2858             |
| 384,6153846       | 1,80E-07          | -27,721              |
| 423,0769231       | 1,72E-07          | -34,9276             |
| 461,5384615       | 1,72E-07          | 3,53393              |
| 500               | 1,59E-07          | -23,8143             |
| 538,4615385       | 1,50E-07          | -26,0644             |
| 576,9230769       | 1,44E-07          | -13,0675             |
| 615,3846154       | 1,39E-07          | 4,9676               |
| 653,8461538       | 1,30E-07          | 7,95304              |
| 692,3076923       | 1,23E-07          | 19,4775              |
| 730,7692308       | 1,11E-07          | 11,7586              |
| 769,2307692       | 1,03E-07          | 18,5266              |
| 807,6923077       | 9,44E-08          | 21,2538              |
| 846,1538462       | 8,33E-08          | 9,77597              |
| 884,6153846       | 7,56E-08          | 10,2373              |
| 923,0769231       | 6,77E-08          | 6,16419              |
| 961,5384615       | 5,97E-08          | -2,73751             |
| 1000              | 4,95E-08          | -31,94               |